



Lauri Vainio

Kitkan hyödyntäminen massiivipuuelementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 27.9.2017

Valvoja: Professori Jari Puttonen

Ohjaaja: DI Jyrki Jalli

Tekijä Lauri Vainio

Työn nimi Kitkan hyödyntäminen massiivipuuelementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa

Koulutusohjelma Rakenne- ja rakennustuotantotekniikka

Pää-/sivuaine Rakennetekniikka

Koodi RAK.thes

Työn valvoja Professori Jari Puttonen

Työn ohjaaja(t) DI Jyrki Jalli

Päivämäärä 27.9.2017

Sivumäärä 90+26

Kieli Suomi

Tiivistelmä

Massiivipuuelementtirakentaminen, eli CLT- ja LVL-rakentaminen, on yleistynyt Suomessa huomattavasti tällä vuosituhanella. Koska rakennustekniikat ja -materiaalit ovat uusia, ei niille ole muodostunut vielä tarkkoja suunnittelunormeja tai -käytäntöjä. Nykyisillä suunnittelukäytännöillä massiivipuukerrostaloihin vaikuttavat vaakavoimat edellyttävät järeitä vaakaliitoksia. Ankkuroitavaa vaakavoimaa voitaisiin vähentää massiivipuuelementtien välisellä kitkavoimalla. Tämän diplomityön tarkoituksena oli tutkia kitkan olemassaoloa ja suuruutta kantavien CLT- ja LVL-seinäelementtien välillä sekä miten kitkavoima voidaan hyödyntää kantavien seinien vaakaliitosten suunnittelussa ankkuroinnin vähentämiseksi.

Työn tavoitteena on ollut selvittää, kuinka suuri osa välitettävästä leikkausvoimasta voidaan siirtää kitkaa hyödyntäen elementiltä toiselle. Työssä perehdyttiin massiivipuuelementtirakentamiseen, sen vaakaliitostekniikoihin ja vaadittuihin mitoituslaskelmiin. Vertailun vuoksi tutustuttiin, miten vaakasuuntaisia leikkausvoimia ankkuroidaan muilla rakennusmateriaaleilla. Alan kirjallisuudesta ja tutkimuksista selvitettiin kitkan toimintaa yleisellä tasolla sekä kitkan toimintaa puupinnoilla. Kirjallisuudesta havaittiin, että puupintojen kitkan suuruuteen vaikuttavat monet samanaikaiset tekijät, kuten puun kosteuspitoisuus, syiden suunta liukusuuntaan nähden ja normaalivoiman aiheuttama puristusjännitys kontaktipintaan.

Työn kokeellisessa osuudessa kitkaa tutkittiin laboratorio-olosuhteissa neljällä eri materiaaliparilla: LVL-LVL, CLT-LVL, CLT-CLT ja LVL-teräs. Tutkimuksessa selvitettiin, miten kappaleiden välisen puristusjännityksen nostaminen vaikuttaa materiaalien välisiin kitkakertoimiin. LVL-kappaleiden kitkaa vertailtiin myös syiden suunnan perusteella. Koekappaleiden puristusjännitykset olivat välillä 1...10 N/mm². Kitkakertoimien verrannollisuutta puristusjännitykseen arvioitiin tilastollisesti regressioanalyysin avulla.

Tutkimuksen tulosten mukaan koemateriaalien kitkakertoimet pääsääntöisesti laskivat puristusjännityksen noustessa. Regressioanalyysin perusteella LVL-teräs-parin kitkakertoimissa havaittiin selkeimmät korrelaatiot puristusjännityksen nousun suhteen. Kitkakertoimien arvojen muutoksiin arvioitiin vaikuttavan kontaktipintojen rakenteiden muodonmuutokset. Tässä tutkimuksessa määritetyt kitkakertoimien arvot asettuivat välille 0,13...0,49.

Avainsanat CLT, LVL, kitka, puurakentaminen



Author Lauri Vainio

Title of thesis Utilization of friction in horizontal joints of load-bearing walls made of solid wood elements

Degree programme Structural Engineering and Building Technology

Major/minor Structural Engineering

Code RAK.thes

Thesis supervisor Professor Jari Puttonen

Thesis advisor(s) Jyrki Jalli, M.Sc. (Tech.)

Date 27.9.2017

Number of pages 90+26

Language Finnish

Abstract

Solid-wood element construction, or CLT and LVL, construction has significantly become more common in Finland in this millennium. However, construction techniques and materials are new, detailed design codes or principles have not yet been created. Horizontal forces that affect solid-wood multi-storey buildings require heavy horizontal joints with present design practices. Such horizontal forces, which need to be anchored, could be reduced by using a friction force between solid-wood elements. Aim of this master's thesis was to study the existence and the amount of friction between load-bearing CLT and LVL wall elements and whether the friction force can be utilized in the design of the horizontal joints of load-bearing elements to reduce the need of anchoring.

Aim of the master's thesis was to observe the quantity of shear that can be transferred by utilizing the friction to an element to another. This thesis investigates solid-wood element construction, horizontal joint techniques and the required design checks. Furthermore, the anchorage of horizontal shear forces in solid wood was compared with those of other materials. The performance of friction in general and on wood surfaces was based on prior literature and research in the field. It was observed in the literature that many simultaneous factors affect the size of friction on wood surfaces, such as the moisture content of wood, grain direction in relation to the sliding direction and the compression stress of the contact surface caused by normal force.

The friction was studied in laboratory conditions in the experimental part of the thesis with four material couples: LVL-LVL, CLT-LVL, CLT-CLT and LVL-steel. The study determined the effect on friction coefficients between materials by increasing compression stress. The friction between the different LVL specimens was also compared based on grain direction. The compression stresses of test specimens were between 1...10 N/mm². The proportionality of friction coefficients to compression stress was evaluated by using a regression analysis.

The results of the research suggest that the friction coefficients of the test materials generally decreased as compression stress increased. The most significant correlation between the friction coefficients and the rise of compression stress was observed in the LVL-steel couple based on the regression analysis. The results suggest that deformations in the structure of the contact surfaces affect the variation in the values of the friction coefficients. The friction coefficients were observed to be between 0.13 and 0.49 in this research.

Keywords CLT, LVL, friction, timber construction

Alkusanat

Tämä diplomityö on tehty IdeaStructura Oy:lle ja Stora Enso Wood Products Oy:lle. Tutkimuksen valvojana on toiminut Aalto-yliopiston professori Jari Puttonen ja ohjaajana toimitusjohtaja Jyrki Jalli IdeaStructura Oy:stä. Stora Enso Wood Products Oy:n puolesta ohjaajana on toiminut R&D and Design Director Juha Sieberg.

Haluan kiittää valvojaani Jari Puttosta ja ohjaajaani Jyrki Jallia työn ohjauksesta ja hyvistä näkökulmista erityisesti työn alku- ja loppuvaiheissa. Stora Enson Juha Siebergiä haluan kiittää tämän diplomityön erittäin mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta sekä työn sisällöllisestä ohjaamisesta. Haluan kiittää myös Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen rakennetekniikan koehallin henkilöstöä, erityisesti Yli-insinööri Veli-Antti Hakalaa, työn kokeellisen osuuden suunnittelun ja toteuttamisen avustamisesta.

Osoitan erittäin suuret kiitokset tämän diplomityön rahoituksesta IdeaStructura Oy:lle ja Stora Enso Wood Products Oy:lle. Rahoituksen ansiosta pystyin keskittymään täysipäiväisesti tämän työn tekoon sekä toiseen ”työhöni” jenkkiputikseen.

Suuret kiitokset perheelleni ja ystävilleni tuesta niin diplomityön kuin koko opiskeluiden aikana. Kiitän myös työkavereitani hyvistä keskusteluista, joita kävimme diplomityöstäni ja sen tutkimuksista. Kaikkein suurimmat kiitokset kuuluvat kuitenkin rakkaalle avovaimolleni Lauralle korvaamattomasta tuesta ja kannustuksesta varsinkin tämän projektin heikoimpina hetkinä.

Viimeisenä haluan kiittää Aalto-yliopistoa mahdollisuudesta opiskella diplomi-insinöörin tutkinto AMK-tutkinnon pohjalta. Pettymys sisäänpääsy-yrityksestä Aaltoon, jonka koin vuonna 2011, kääntyi tämän mahdollisuuden ansiosta loppujen lopuksi isoksi onnistumiseksi.

Helsinki 27.9.2017

Lauri Vainio

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät

Lyhenteet

1	Johdanto	1
1.1	Tausta	1
1.2	Tavoitteet	2
1.3	Rajaus	3
2	Massiivipuuelementtirakentaminen	3
2.1	Massiivipuu rakennusmateriaalina	3
2.1.1	CLT	3
2.1.2	LVL	4
2.2	Runkorakentamisjärjestelmä massiivipuusta	4
2.3	Kantavien massiivipuuseinäelementtien vaakaliitokset	6
2.3.1	Kantavan LVL-väliseinän liitos LVL-välipohjaan	7
2.3.2	Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-välipohjaan	8
2.3.3	Kantavan CLT-väliseinän liitos kantavaan CLT-väliseinään	9
2.3.4	Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-välipohjaan teräslevyllä	10
2.4	Kitka vaakaliitosten mitoituksessa	11
2.5	Massiivipuuseinäelementtien mitoitus leikkaukselle	12
2.6	Massiivipuuseinäelementtien vaakaliitosten mitoitus	15
2.6.1	Vaneri-CLT-lapepinta-liitos	15
2.6.2	Teräslevy-LVL-lapepinta- ja teräslevy-CLT-lapepinta-liitos	16
2.6.3	Teräslevy-CLT-syrjäpinta-liitos	18
2.7	Vaakasuuntaisten leikkausvoimien ankkurointi muilla materiaaleilla	18
3	Pintojen välinen kitka	22
3.1	Pintojen karheus	22
3.2	Kiinteiden pintojen välinen kontakti	23
3.3	Adheesio	25
3.4	Kitka	26
3.4.1	Kitkavoiman ja normaalivoiman välinen yhteys	27
3.4.2	Liukukitkakerroin ja -voima	28
3.4.3	Lepokitkakerroin ja -voima	29
3.4.4	Stick-slip-ilmiö	31
4	Kitka puupinnoilla	31
4.1	Suuruusluokkaan vaikuttavat tekijät	31
4.1.1	Kosteuspitoisuus	32
4.1.2	Puun syiden suunnan merkitys	32
4.1.3	Pintojen laatu ja karheus	35
4.1.4	Puristusjännityksen suuruus	37
4.2	Kitkakertoimien arvot kirjallisuudessa	39
5	Kitkan selvittäminen massiivipuussa kokeellisin menetelmin	41
5.1	Tutkimusmateriaalit, -kappaleet ja -olosuhteet	41
5.2	Koejärjestely	44
5.3	Tulosten tilastollinen arviointi	48

5.4	Tulokset	52
5.4.1	LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan	52
5.4.2	LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa .	56
5.4.3	CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan	59
5.4.4	CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa	63
5.4.5	CLT-CLT, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan	67
5.4.6	LVL-teräs, LVL:n lapepinnat teräspintaa vastaan	73
6	Kokeellisten tulosten arviointi	76
7	Johtopäätökset	81
	Lähdeluettelo	85
	Liiteluettelo	90
	Liitteet	

Merkinnät

A_i	[mm ²]	kitkapintojen välinen yksittäinen karheushuippu
A_r	[mm ²]	kitkapintojen välinen kontaktipinta-ala
A_s	[mm ²]	leikkausraudoituksen poikkileikkausala
$A_{S,net}$	[mm ²]	CLT:n ristikkäisten lamellikerrosten lautojen poikkipinta-ala
D	[mm]	ruuville puuhun poratun reiän halkaisija
F		F-testisuure
$F_{ax,Rk}$	[N]	yhden naulan ulosvetokestävyys
F_f	[N]	kitkavoima
$F_{f,k}$	[N]	liukukitkavoima
$F_{f,k,max}$	[N]	maksimiliukukitkavoima
$F_{f,s}$	[N]	lepokitkavoima
$F_{H,d}$	[N]	seinään vaikuttava vaakavoima
F_n	[N]	normaalivoima
$F_{ps,k}$	[N]	teräslevyllisen liitoksen palalohkeamiskestävyys ominaisarvo
$F_{R,d}$	[N/mm ²]	valittujen liittimien kestävyys mitoitusarvo
G_k	[N]	seinään vaikuttavien pysyvien pystykuormien resultantin ominaisarvo
H	[N/mm ²]	kovuus
I_p	[mm ²]	polaarinen jäyhyysmomentti
$L_{net,t}$	[mm]	leikkauksessa murtuneen alan nettopituus
M_T	[Nmm]	leikkausvoiman aiheuttama vääntömomentti
N_{Ed}	[N]	normaalivoiman mitoitusarvo ominaisarvo
Q_{Ed}	[N]	leikkausvoiman mitoitusarvo
R^2		regressiomallin selitysaste
R_a	[μm]	karkeuskeskiarvo
R_d	[N]	yksittäisen naulan mitoitusleikkauskestävyys
R_k	[N]	yksittäisen naulan ominaisleikkauskestävyys
a_i	[mm]	liitinväli
b	[mm]	leikkauskitkamallin liittymän leveys
c		betonin pintatyyppin koheesiokerroin
c_v		variaatiokerroin
d	[mm]	naulan paksuus
f_{cd}	[N/mm ²]	betonin puristuslujuuden mitoitusarvo
f_{ctd}	[N/mm ²]	betonin vetolujuuden mitoitusarvo
$f_{h,k}$	[N/mm ²]	puun reunapuristuslujuus
$f_{R,k}$	[N/mm ²]	CLT:n rolling shear -lujuuden ominaisarvo
f_{sd}	[N/mm ²]	leikkausraudoituksen mitoituslujuus
$f_{t,0,k}$	[N/mm ²]	puun vetolujuuden ominaisarvo syysuuntaisessa vedossa
$f_{v,0,k}$	[N/mm ²]	puun tasoleikkauslujuuden ominaisarvo syiden suuntaan
$f_{v,k}$	[N/mm ²]	leikkauslujuuden ominaisarvo
$f_{v,S,k}$	[N/mm ²]	CLT:n lamellikerroksen lautojen ominaisleikkauslujuus
$f_{v,T,k}$	[N/mm ²]	CLT:n risteävien lautojen välisen liimasauman vääntöleikkauslujuuden
k_l		puulevyn materiaalista riippuva kerroin
k_{mod}		puun muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman kesto ja puun kosteuspitoisuus

k_s		ankkuri- tai kierrenaulan tunkeumaan vaikuttava kerroin
k_p		puutavaran ominaistiheydestä riippuva kerroin
n_1		liitinrivien lukumäärä puun syysuunnassa
n_2		liitinrivien lukumäärä puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa
s	[mm]	leikkauskitkamallin liittymän pituus
t_2	[mm]	yksileikkeisen naulaliitoksen kärjen puoleinen tunkeuma
t_{ef}	[mm]	palalohkeamiskestävyyden tehollinen paksuus
t_t	[mm]	puuliitoksen teräslevyn paksuus
w_i	[mm]	leikkauskitkamallin pystysuuntainen siirtymä
\bar{x}		selittävän muuttujan x havaittujen arvojen aritmeettinen keskiarvo
x_i		selittäjän eli selittävän muuttujan x ei-satunnainen ja havaittu arvo havaintoyksikössä i
\bar{y}		selitettävän muuttujan y havaittujen arvojen aritmeettinen keskiarvo
\hat{y}_i		estimoidun regressiosuoran selitettävälle muuttujalle y antama arvo havaintopisteessä x_i
y_i		selitettävän muuttujan y satunnainen ja havaittu arvo havaintoyksikössä i
α	[°]	leikkausraudoituksena toimivan ankkurointiteräksen kulma
β_0		ei-satunnainen ja tuntematon vakio eli vakio selittäjän regressiokerroin
β_1		selittäjän x ei-satunnainen ja tuntematon regressiokerroin
γ	[°]	höylän terän rintakulma
γ_M		puun materiaaliominaisuuden osavarmuusluku
δ_s	[mm]	leikkauskitkamallin vaakasuuntainen siirtymä
ε_i		residuaalin eli jäännöstermin ε satunnainen ja ei-havaittu arvo havaintoyksikössä i
θ	[°]	kitkakulma
μ		kitkakerroin
μ_k		liukukitkakerroin
$\mu_{k,max}$		maksimiliukukitkakerroin
μ_s		lepokitkakerroin
μ_v		betonin leikkauskitkakerroin
ν		betonin lujuuden pienennyskerroin
ρ	[%]	raudoitussuhde
ρ_k	[kg/m ³]	puutavaran ominaistiheys
σ		otoskeskihajonta
σ_n	[N/mm ²]	normaalivoimasta johtuva normaalijännitys
σ_y	[N/mm ²]	myötölujuus
τ_{Rdi}	[N/mm ²]	betonisen työsauman leikkauskestävyyden mitoitusarvo
$\tau_{T,d}$	[N/mm ²]	vääntöleikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{V,d}$	[N/mm ²]	leikkausjännityksen mitoitusarvo
$\tau_{V,S,d}$	[N/mm ²]	CLT:n lamellikerroksen lautojen leikkausjännityksen ominaisarvo

Lyhenteet

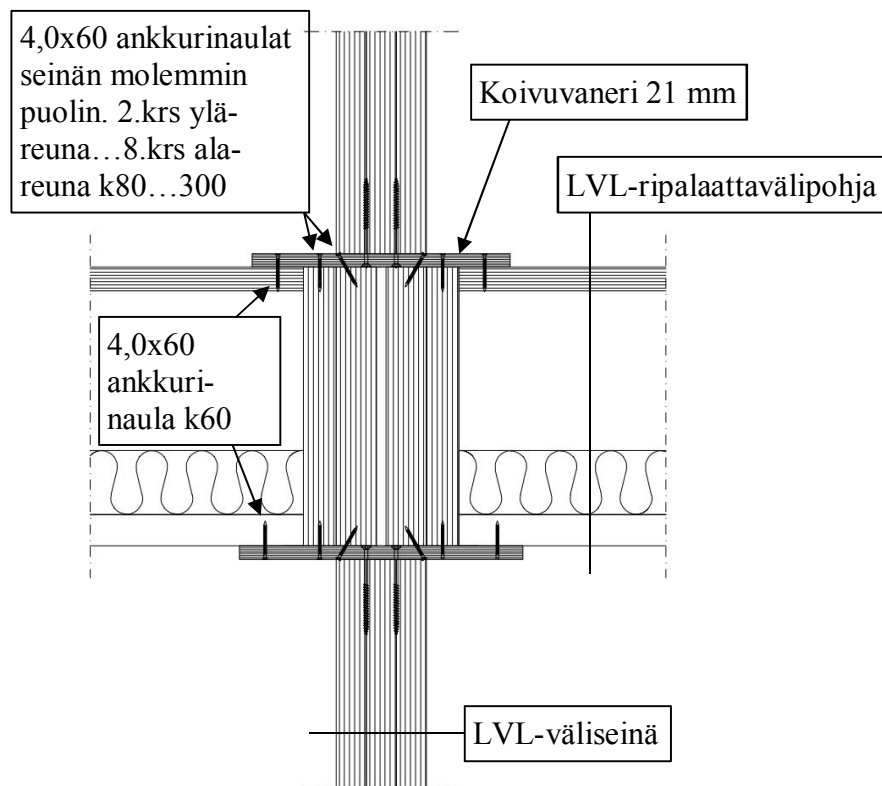
CLT	Cross Laminated Timber, ristiinliimattu puu
LVL	Laminated Veneer Lumber, viilupuu
RIL	Rakennusinsinööriliitto
SSE	Sum of Squares Erros, estimoidun regressiomallin residuaalien eli jäännösvirheiden vaihtelua kuvaava jäännösneliösumma
SSM	Sum of Squares Model, estimoidun regressiomallin malli- eli regressioneliösumma
SST	Sum of Squares Total, regressiomallin selitettävän muuttujan y arvojen vaihtelua kuvaava kokonaisneliösumma

1 Johdanto

1.1 Tausta

Puukerrostalorakentaminen on yleistynyt huomattavasti Suomessa tämän vuosikymmenen aikana. Nykypäivänä puukerrostalojen rakentamisessa käytetään yleisesti massiivipuulementtitekniikkaa. Massiivipuulementtitekniikalla tarkoitetaan CLT- ja LVL-elementtitekniikkaa. CLT tulee sanoista cross laminated timber, joka tarkoittaa suomeksi ristiinliimattua puuta. LVL on lyhenne sanoista laminated veneer lumber, jonka suomenkielinen termi on viilupuuh. Puuelementtirakentaminen yrittää kehittyä varteenotettavaksi kilpailijaksi betonielementtiteollisuudelle massiivipuulementtitekniikoiden avulla. Vaikka puurakentaminen on ollut nousussa viime vuosina, on puurakentaminen ollut talonrakennusallalla suhteellisen vähäistä verrattuna perinteiseen betoni- ja teräsrakentamiseen. Suomessa uusista kerrostaloista vain noin 6% on puurunkoisia (Mäki-Petäjä 2016). Puuelementtirakentamisen yhtenä etuna betonielementtirakentamiseen verrattuna voidaan pitää rakentamisen nopeutta, kun esimerkiksi betonin kovettumiseen käytettävää aikaa ei synny.

Puurakentamisen uudehkojen tekniikoiden vuoksi mitoitusstandardit, -ohjeet ja -käytännöt ovat kehittymässä. Erityisesti puuelementtien liitosten mitoituksessa ei ole huomioitu kaikkia puun ominaisuuksia liitosten voimansiirto-ominaisuuksien kannalta. Helsingin Jätkäsäareen on rakenteilla Wood City-puukortteli, johon on rakennutettu kahdeksan kerroksisia puurunkoisia asuinkerrostaloja. Kerrostalot on rakennettu käyttäen LVL-seinäelementtejä ja LVL-ripalaattaväliä. Kuva 1:ssä on esitetty, miten ripalaattaväliä on kiinnitetty kantaviin huoneistojen väliseiniin kyseisissä kohteissa.



Kuva 1. Detalji LVL-ripalaattaväliä ja kantavan LVL-väliseinän liitoksesta (Kokkonen 2017).

Mitoituskuormitukset Jätkäsaaren kohteen kantaville väliseinille ovat 20...70 kN/m välillä. Kantavat LVL-väliseinäelementit kiinnitetään LVL-ripalaattoihin nauloin LVL-väliseinäelementin ylä- ja alapäässä olevien vanerilevyjen avulla. Liitoksessa on käytetty Ø4x60 ankkurinauloja, jotka kiinnitetään paineilmanaulaimella seinän yläpäästä seinän molemmin puolin kolmessa rivissä kerroksesta riippuen k60 ja k80...300 jaolla. Naulojen tarkoitus on ottaa vastaan seinään kohdistuvat vaakavoimat. Nauloja voi tulla siis sekä elementin ylä- että alapäähän pelkästään yhden metrin matkalle noin 92 kappaletta. Naulojen suuren määrän vuoksi väliseinäelementtien kiinnitys on todella aikaa vievä työvaihe työmaalla. Itse naulaamisen lisäksi naulojen paikat tulee ensin merkata oikealla jaolla, ja nau-lauksen jälkeen lyödä uppoamattomat naulat loppuun asti sisään. Tämä työvaihe heikentää huomattavasti rakentamisen nopeutta, joka voisi olla puuelementtirakentamisen vahvuuksia verrattuna esimerkiksi betonielementtirakentamiseen.

Vaakasuuntaista leikkausvoimaa, joka tulee mitoituksessa ottaa huomioon kantavan välisei-nän ja lattian liitoksessa, voitaisiin pienentää käyttämällä hyväksi puuelementtien välistä kit-kavoimaa. Itävaltalaisessa proHolz CLT-mitoituskäsikirjan mukaan puuelementtien väli-senä kitkakertoimenä voitaisiin käyttää arvoja 0,2...0,5 väliltä (Wallner Novak et al., s.137). Jos kiinnitettäviä vaakavoimia voitaisiin vähentää kitkavoiman avulla, kiinnitettävää vaaka-voimaa olisi 20...50% vähemmän. Näin kiinnitettäviä nauloja tulisi huomattavasti vähem-män, ja naulaamiseen käytettävää aika lyhenisi merkityksellisesti työmaalla. Puurakenteiden suunnittelun Eurokoodi EN 1995-1-1 ei ota kantaa kitkan hyödyntämiseen.

Tämän diplomityön virallisena ohjaustahona toimii korjausrakentamiseen erikoistunut insi-nööritoimisto IdeaStructura Oy. Aihe tälle diplomityölle on saatu Stora Enso Wood Products Oy:n kokemuksista ja kehitysaihioista. Diplomityö tehdään yritysten kanssa yhteistyössä, ja siksi molemmat yritykset ovat toimineet tämän tutkimuksen rahoittajina. Stora Ensolla ol-laan aikeissa tutkia CLT:n ja LVL:n kitkatoimintaa laajemmin, ja tämä tutkimus toimii esi-selvityksenä näille laajemmille tutkimuksille.

1.2 Tavoitteet

Tämän diplomityön päätarkoituksena on tutkia lepo- ja liukukitkan olemassaoloa ja suu-ruutta CLT- ja LVL-väliseinäelementtien välillä sekä miten kitkavoima voidaan hyödyntää kantavien seinien vaakaliitosten suunnittelussa. Tutkimuksen ensimmäinen päätavoite on perehtyä massiivipuuelementtirakentamiseen, vaakaliitosten periaatteisiin ja kitkan toimin-taan. Ensimmäisen päätavoitteen saavuttamiseksi selvitetään

- miten massiivipuuta käytetään kerrostalojen runkorakentamisessa ja erityisesti kan-tavissa väliseinissä
- asioita, jotka tulee ottaa huomioon kantavien massiivipuuväliseinien ja niiden liitos-ten suunnittelussa
- pintojen, ja erityisesti puupintojen, välisen kitkan toimintaa sekä kitkaan vaikuttavia tekijöitä.

Tutkimuksen toinen päätavoite on selvittää CLT- ja LVL-pinnoissa vaikuttavan kitkan suu-ruutta kokeellisin menetelmin laboratorio-olosuhteissa. Toisen päätavoitteen täyttämiseksi

- määritetään koejärjestelmä, jonka avulla lepo- ja liukukitkaa voidaan selvittää edellä mainituilla puutuotteilla ottamalla huomioon ensimmäisessä päätavoitteessa saavu-tetut teemat
- kokeen tuloksia ja niiden luotettavuutta arvioidaan tilastollisia menetelmiä käyttäen

- kitkakokeiden tulosten pohjalta arvioidaan, miten ensimmäisen päätavoitteet teemat ovat vaikuttaneet mittaustuloksiin.

1.3 Raja

Tutkimus on rajattu soveltumaan CLT- ja LVL-runkoisiin, enintään kahdeksan kerroksisiin, asuinkerrostaloihin, ja sen käyttöluokkaa vastaaviin olosuhteisiin. Työ on rajattu edellä mainitulla tavalla, koska väliseinäliitoksen ongelma on havaittu vastaavanlaisissa rakennuksissa. Jotta itse kitkan olemassaoloon ja suuruuteen voitaisiin perehtyä kunnolla, tässä tutkimuksessa ei oteta huomioon kantavien seinien vaakaliitosten kitkavoiman hyödyntämistä palotilanteessa. Työssä tutkitaan, miten Kuva 1:n väliseinän ja välipohjan liitos voitaisiin toteuttaa paremmin markkinoilla olevilla liittimillä hyödyntäen massiivipuuväliseinäelementtien välistä kitkaa. Työn tarkoituksena ei ole kehittää uutta liitintä tai liitintekniikkaa, vaan hyödyntää olemassa olevia tekniikoita tehokkaammin.

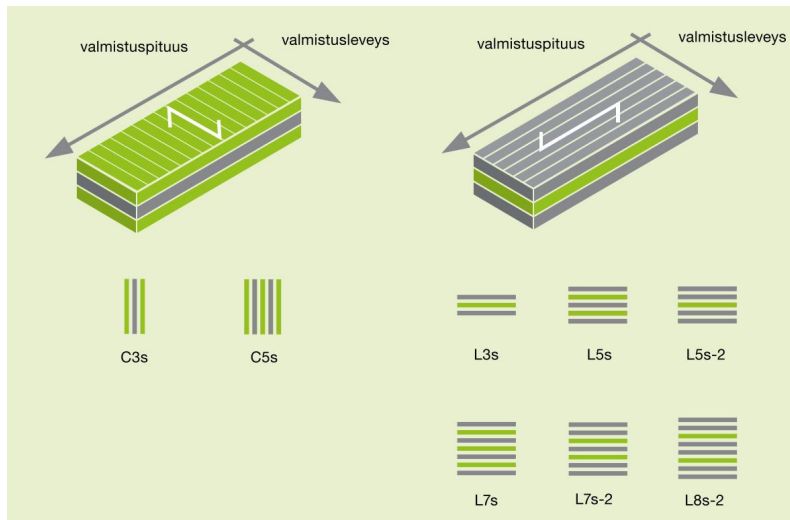
2 Massiivipuuelementtirakentaminen

2.1 Massiivipuu rakennusmateriaalina

2.1.1 CLT

CLT eli Cross Laminated Timber on massiivipuinen rakennusmateriaali. CLT tuotetaan levyinä, jotka koostuvat vähintään kolmesta ristikkäin liimatusta lamelli- eli puulevykerroksesta. CLT-levyissä on joko kolme, viisi, seitsemän tai kahdeksan lamellikerrosta. CLT-levyjä on saatavilla useina eri paksuuksina, ja ne koostuvat siksi useista eri paksuisista lamellikerroksista. (Stora Enso 2015a.) Lamellit koostuvat laudoista, jotka voivat olla 40...300 mm leveitä ja 6...45 mm paksuja (Wallner-Novak et al. 2014, s.8). CLT-levy on yleensä vähintään 60 mm ja enintään 320 mm paksu. Lamellit liitetään toisiinsa liimaamalla. Levyjen puumateriaalina käytetään kuusta, tosin keskilamellit saattavat sisältää mäntyä. (Stora Enso 2015a.) Lehtipuiden, kuten koivun, käyttö CLT:n materiaalina on mahdollista tulevaisuudessa ja tällä hetkellä tutkimusten alaisuudessa, mutta käyttö ei kata vielä nykyisiä laatuvaatimuksia (Wallner-Novak et al. 2014, s.8). CLT-levyissä käytettyjen puulamellien vakioaluusluokka on C24 (Stora Enso 2015b).

Kuva 2:ssa on esitetty eri levytyyppien lamellikerrosten asennussuunnat ja -järjestykset. Elementit, joiden pintakerrosten lamellit ovat samansuuntaiset valmistusleveuden eli elementin lyhyemmän sivun kanssa, merkitään tunnuksella C. Tätä elementtityyppiä käytetään esimerkiksi seinärakenteissa. Elementeissä, jotka on merkitty tunnuksella L, pintakerroksen lamellit ovat samansuuntaiset valmistuspituuden eli elementin pidemmän sivun kanssa. L-tunnuksella merkityjä elementtejä käytetään ylä- ja välipohjina sekä pystysuorassa palkkimaisina rakenteina. (Wallner-Novak et al. 2014, s.16.)

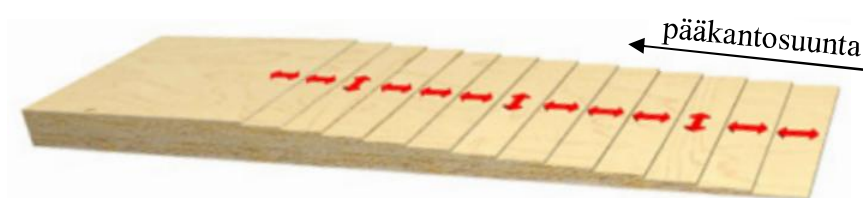


Kuva 2. CLT-levyjen lamellikerrosten mahdolliset asennussuunnat ja -järjestykset (Stora Enso 2015a).

CLT:tä on valmistettu vuodesta 1995 asti, mutta materiaalia ei ole vielä sisällytetty mitoitusstandardeihin. CLT:n sisällyttäminen Eurokoodi 5:n mitoitusstandardeihin on tämän diplomityön tekohetkellä työn alla. CLT on hyväksytty käytettäväksi rakenteiden käyttöluokissa 1 ja 2. (Wallner-Novak et al. 2014, s.10.) Käyttöluokissa 1 ja 2 ympäröivän ilman suhteellinen kosteus ylittää arvon 65 % ja 85 % samassa järjestyksessä vain muutamana viikkona vuodessa, ja puun kosteus molemmissa luokissa on lämpötilaa 20 °C vastaava (SFS-EN 1995-1-1).

2.1.2 LVL

LVL on lyhenne sanoista Laminated Veneer Lumber, joka tarkoittaa suomeksi viilupuuta. LVL:ä valmistetaan liimaamalla 3 mm paksuja viiluja toisiinsa lämmön ja paineen avulla. LVL-tuotteita on saavilla kolmessa eri laadussa. T-laadussa viilukerrosten syysuunta on pitkittäinen, ja siitä syystä niitä käytetään tyypillisesti väliseinätolppina. S-laadun tuotteet sopivat parhaiten puurunkorakentamisessa palkkeihin. X-laadussa joka neljäs viiluista laminoidaan ristiin (Kuva 3), ja on siksi parhaiten soveltuva seinälevyihin. Levyjen pääkantosuunta on samansuuntainen ristiinlaminoimattomien viilujen syiden kanssa. (Stora Enso 2017.) LVL:n yhdeksi eduksi voidaan todeta, että tuotteet pysyvät suorina sen jälkeen, kun tasapainokosteuden olosuhteet on saavutettu (Rowell 2005, s.291).



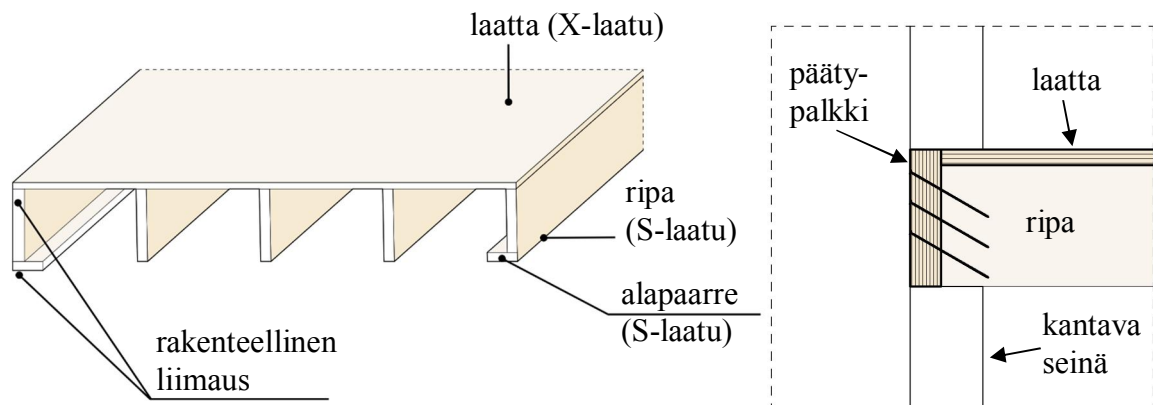
Kuva 3. X-laadun viilujen suunnat (Stora Enso 2017).

2.2 Runkorakentamisjärjestelmä massiivipuusta

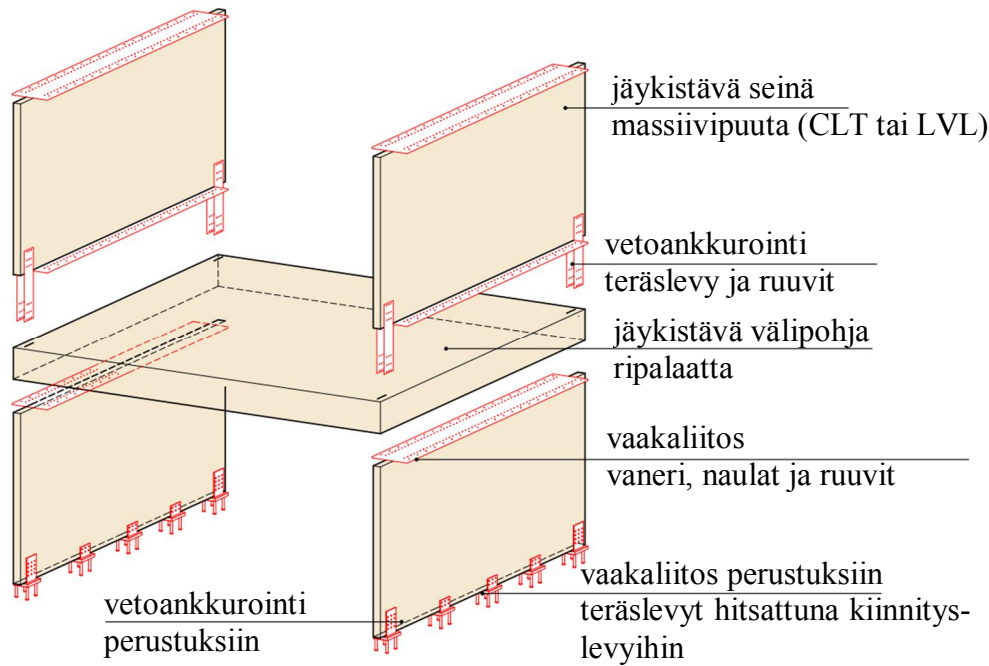
Massiivipuutuotteita voidaan käyttää kantavissa ja ei-kantavissa rakenteissa monin eri tavoin. CLT:tä ja LVL:ää voidaan käyttää niin 1-kerroksisen pientalon kuin korkean, yli 8-kerroksisen rakennuksen rungon rakentamisessa. Tämä työ on rajattu käsittelemään raken-

tamisjärjestelmää ja sovelluksia korkeintaan 8-kerroksisiin asuinkerrostaloihin. Diplomi-työn toinen toimeksiantaja Stora Enso on laatinut rakentamisjärjestelmän Building Systems by Stora Enso massiivipuurunkoisille asuinkerrostaloille, joka käsitellään ja jota hyödynnetään tämän diplomityön tutkimuksissa. (Stora Enso 2016.)

Stora Enson kantava rakennejärjestelmä perustuu CLT-seinäpaneeliin ja rakenteellisesti liimattuihin pitkien jännevälien LVL-ripalaattoihin (Kuva 4). Ripalaatan laattaosa on X-laattua, jonka syiden pääkantosuunta on sama välipohjaelementin kantosuunnan kanssa. Välipohjaelementin päätypalkki kantavien seinien välissä on myös X-laattua. Pintalaattaa käytetään rakennuksen rungossa jäykistävänä levykenttänä. Ripa- ja alapaarreosat ovat S-tyyppiä. (Stora Enso 2016.) Kantavina seinärakenteina voidaan käyttää vaihtoehtoisesti myös kerrannaisliimattuja LVL-seinälevyjä sekä välipohjissa CLT- tai LVL-levyelementtejä (Kokkonen 2017). Rakentamisjärjestelmän rungon jäykistys on toteutettu kokonaan massiivipuuseinäelementeillä (Kuva 5). Varioimalla kantavien liitosten tyyppiä sekä niiden jäykkyyttä, järjestelmän rakenteellista toimintaa voidaan säätää rakennuksen korkeuden mukaan. Kantavien runkoelementtien väliset liitokset ovat puu-puu-liitoksia ilman pehmeitä eristekerroksia. Liitosten vaakavoimat ohjataan puuosien rajapintojen läpi puun syiden ollessa samansuuntaiset voiman kanssa. (Stora Enso 2016.)



Kuva 4. LVL-ripalaatan rakenne ja välipohjaelementin päätypalkki (Stora Enso 2016).



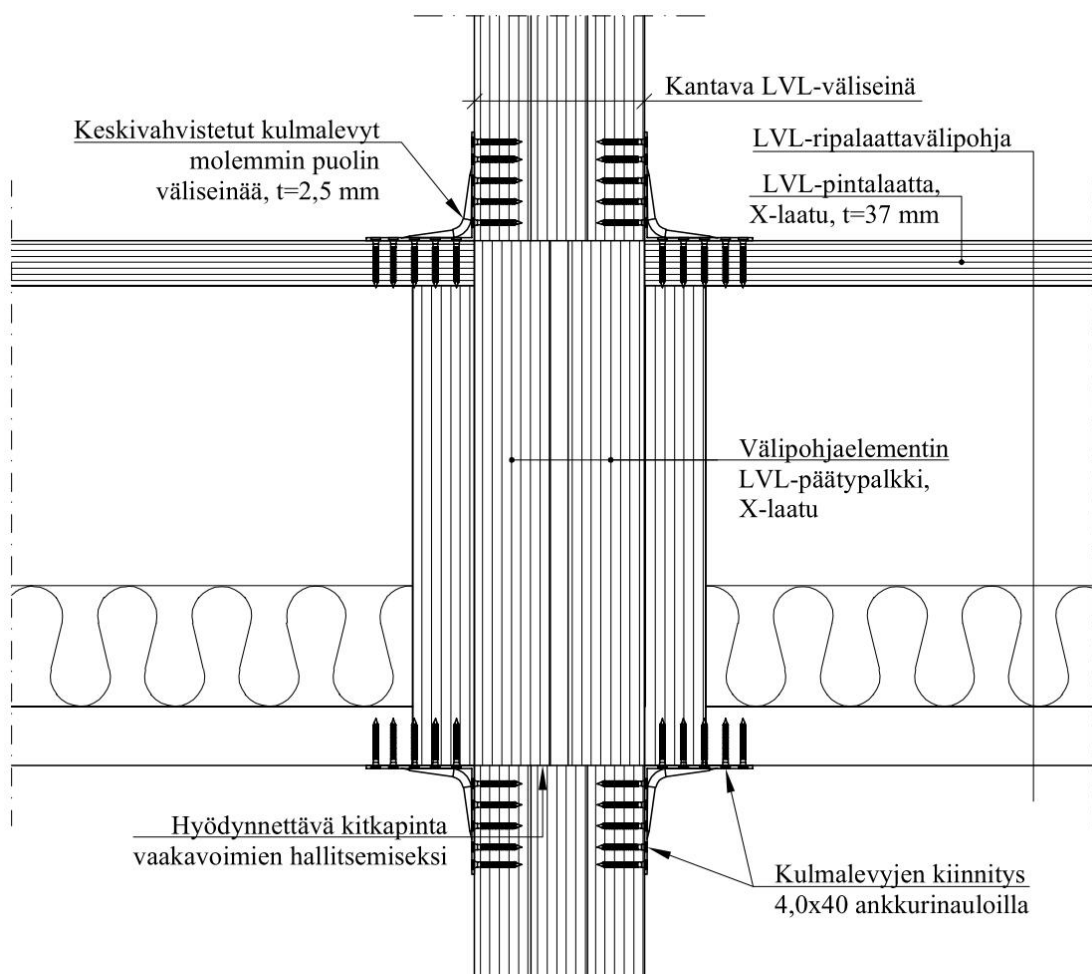
Kuva 5. Rakentamisjärjestelmän jäykistyksen periaate (Stora Enso 2016).

2.3 Kantavien massiivipuuseinäelementtien vaakaliitokset

Luvussa 1 ”Johdanto” Kuva 1:ssä esiteltiin Building Systems by Stora Enso -rakentamisjärjestelmän tyypillinen kantavien seinien vaakaliitos. Kantavien seinäelementtien ylä- ja alapäähän on kiinnitetty elementtitehtaalla vanerikaista, jonka avulla kantavat seinäelementit, LVL-ripalaatat ja -reunapalkit liitetään toisiinsa kiinni. Vaneri ja siihen kiinnitetyt ankkurinaulat on suunniteltu ottamaan vastaan rakennuksen runkoon kohdistuvat vaakavoimat. Tällä suunnitteluratkaisulla yhteen liitokseen tulee erittäin suuri määrä nauloja kiinnitettäväksi. Vanerikaistojen takia seinä- ja ripalaattaelementtien välistä kontaktia ja kontaktista syntyvää kitkavoimaa ei voida tällöin hyödyntää. Tässä luvussa esitellään periaatteet neljästä vaihtoehtoisesta tavasta toteuttaa Kuva 1:n tyypillinen kantavien väliseinien ja välipohjien välinen liitosdetalji. Liitokset pohjautuvat Building Systems by Stora Enso -rakentamisjärjestelmän tyypirunkodetaljeihin ja Stora Enson Jätkäsaaren Wood City -kohteen runkodedaljeihin (Stora Enso 2016; Kokkonen 2017).

2.3.1 Kantavan LVL-väliseinän liitos LVL-välipohjaan

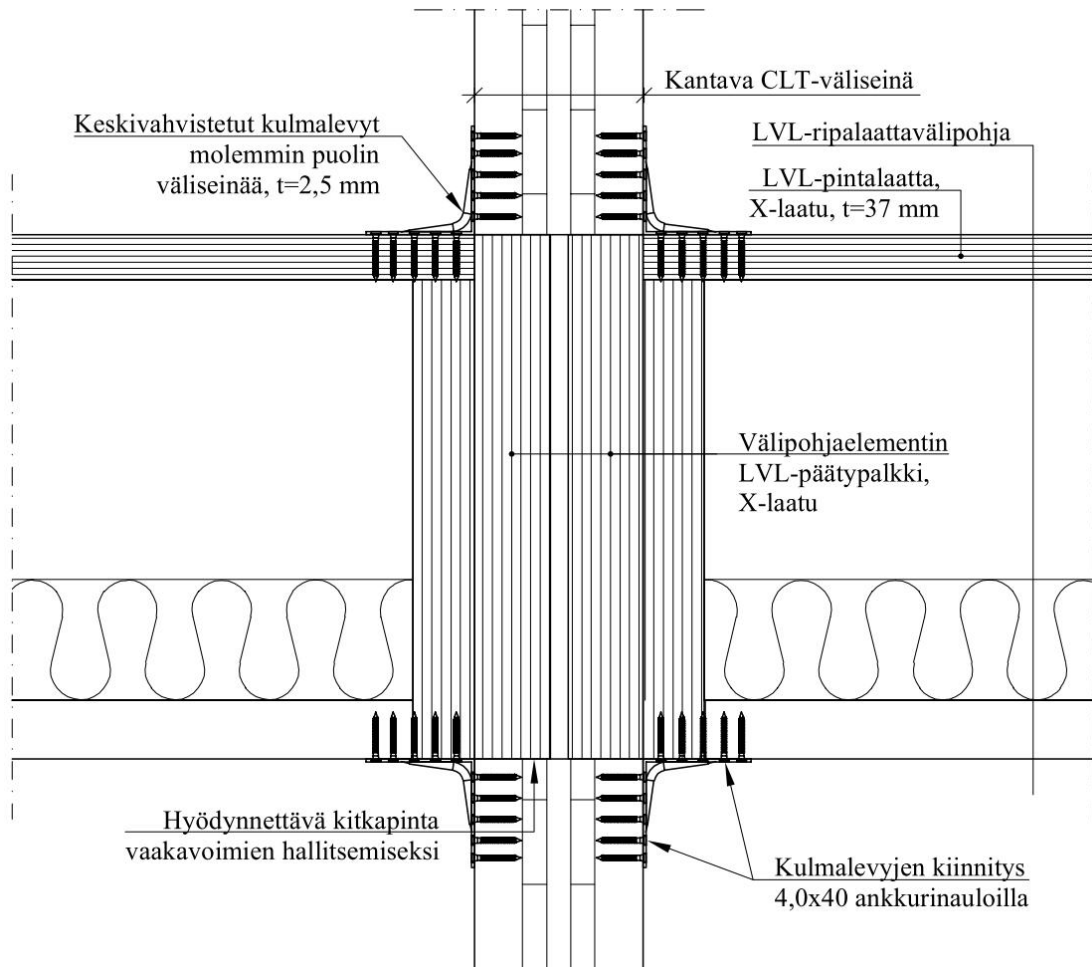
Kuva 6:ssa on esitetty kerrannaisliimatun LVL-väliseinäelementin liitos LVL-ripalaattaelementteihin. Väliseinät toimivat ripalaattojen tukina eli elementtien kantosuunta on kohtisuoraan seiniin nähden. Vaakaliitoksen mitoituksessa hyödynnetään LVL-väliseinän ja välipohjaelementin päätypalkin kontaktipintojen välille syntyvää kitkaa. Sekä päätypalkin että väliseinän pääkantosuunta on kohtisuoraan kontaktipintaa vastaan. Väliseinät ja välipohjaelementit kiinnitetään toisiinsa keskivahvistetuilla kulmalevyillä ja samankokoisilla ankkurinauloilla, joita käytettiin Kuva 1:n esimerkissä. Ankkurinauloja käytetään tyypillisesti rakennushelojen kiinnityksissä. Keskivahvistetut kulmalevyt ovat jäykempiä kuin normaalit kulmalevyt, joten ankkuroitavaa vakaavoimaa voidaan ohjata enemmän yhdelle liitokselle. Keskivahvistettujen kulmalevyjen käyttö on yleinen tapa CLT-seinäelementin ja CLT-välipohjan liitoksessa, sillä se on yksinkertainen ja tehokkaimpia kiinnitystyyppisiä lujuuden suhteen (Fallis et al. 2011). Samaa periaatetta on hyödynnetty tämän liitoksen suunnittelussa.



Kuva 6. Kantavan LVL-väliseinän liitos LVL-ripalaattavälipohjaan.

2.3.2 Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-riipalaattavälipohjaan

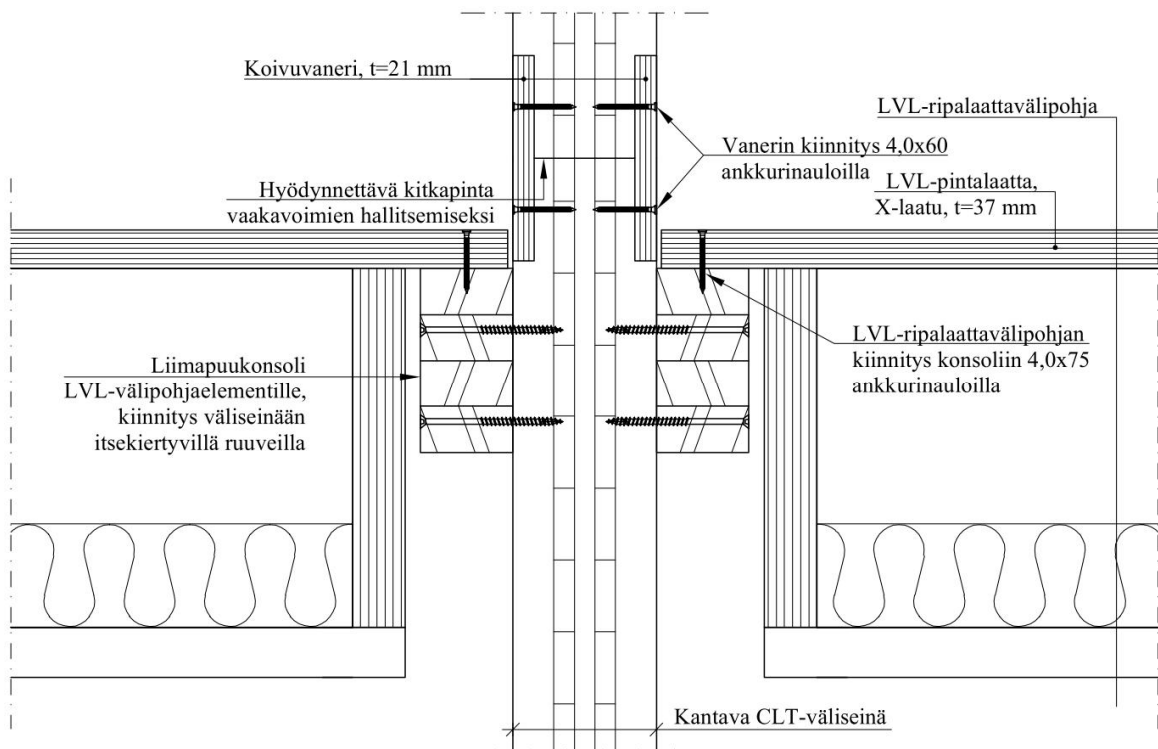
CLT-väliseinäelementin liitos LVL-riipalaattaelementteihin on esitetty Kuva 7:ssä. Liitos on periaatteeltaan samanlainen kuin kantavan LVL-väliseinän liitos LVL-välipohjaripalaattaan edellisessä luvussa. Laattojen kantsuunta on kohtisuoraan CLT-seiniä vastaan. Tässä vaakaliitoksessa kitkapinta syntyy välipohjaelementin päätypalkkien ja CLT-seinän välille. CLT-seinän pystysuuntaiset kuormat oletetaan mitoitusilanteessa kohdistuvan vain pystysuuntaisille lamellikerroksille.



Kuva 7. Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-riipalaattavälipohjaan.

2.3.3 Kantavan CLT-väliseinän liitos kantavaan CLT-väliseinään

Kuva 8:ssä on esitetty kahden kantavan CLT-väliseinäelementin liitos toisiinsa. Toisin kuin kahdessa edellisessä vaakaliitostyyppissä, seinäelementit on liitetty yhteen kahdella koivuvanerikaistalla. Vanerit, ankkurinaulat ja CLT-elementtien välinen kontakti ottavat vastaan CLT-seinään kohdistuvat vaakavoimat. Koivuvanerin leikkauskestävyys on suurempi kuin havuvanereiden, joten se kestää paremmin liitokseen kohdistuvia vaakavoimia (Kevarinmäki 2017). Vaneriliitoksen ja CLT-CLT-kontaktiparin avulla liitoksen leikkausjäykkyys on korkea. Vaneri välittää ylemmän seinään kohdistuvan normaalivoiman alemmalle seinälle, sillä koivuvanerin puristuslujuus on suurempi (27 N/mm^2) kuin C24-lujuusluokan CLT-elementtien (21 N/mm^2) (Metsäteollisuus 2005, s.19; Kevarinmäki 2017). LVL-välipohjaelementin kantosuunta on samansuuntainen CLT-seinän pituuden kanssa. Välipohjaelementtien pintalaatat tukeutuvat reunoiltaan liimapuukonsolien päälle. Liimapuukonsolit kiinnitetään CLT-seinän lapepintaan riittävän pitkällä itsekiertyvillä ruuveilla, jotta ruuvien uppouma on tarpeeksi syvä. Sama koskee ruuveja, joilla ripalaattavälipohjan kansilaattaa kiinnitetään liimapuukonsoliin.

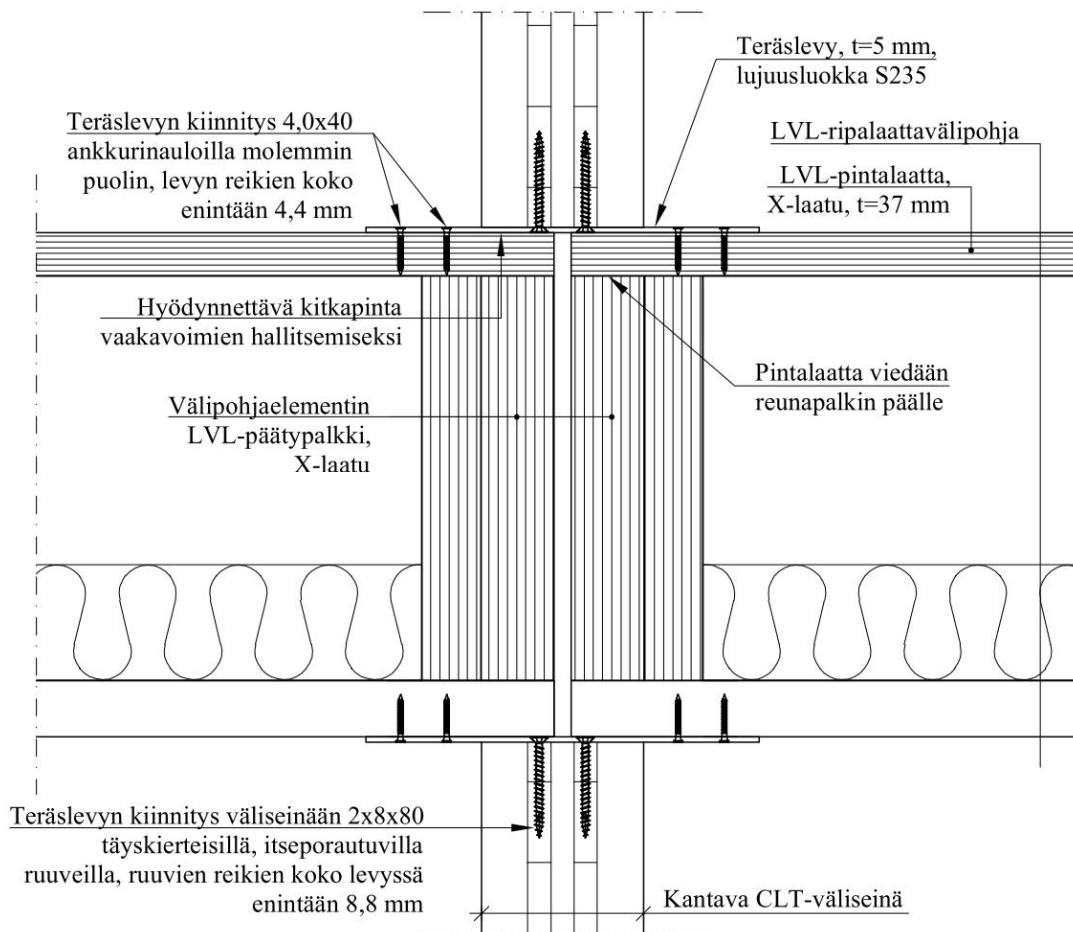


Kuva 8. Kantavan CLT-väliseinän liitos kantavaan CLT-väliseinään.

2.3.4 Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-välipohjaan teräslevyllä

Kuva 9:n CLT-väliseinän liitos LVL-ripalaattaelementtiin on periaatteeltaan samanlainen kuin Johdanto-luvussa esitetty alkuperäinen vaakaliitosdetalji. Alkuperäiseen liitokseen verrattuna leikkausvoimia vastaanottava vaneri on korvattu rakenneteräslevyllä ja ripalaatan pintalaatat on jatkettu reunapalkkien päälle. Teräslevy, ankkurinaulat ja LVL-pintalaatan lapepinnan ja teräksen välinen kitkapinta ottavat vastaan liitokseen kohdistuvat vaakavoimat. Teräslevy kiinnitetään CLT-seinän syrjäpintaan itseporautuvilla ruuveilla. Ruuvien tulee kestää liitokseen aiheutuvat leikkausvoimat, jottei murto tapahdu teräslevyn ja CLT-elementin rajapinnassa. Teräslevyn leikkauslujuus on paljon korkeampi kuin koivuvanerin, mikä lisää liitoksen jäykkyyttä alkuperäiseen liitokseen verrattuna.

Liitoksessa käytetään luvun 2.6.2 määritelmien mukaan paksua teräslevyä ankkurinaulojen halkaisijaan nähden. Paksun teräslevyn liitoksen ruuvien leikkauskestävyys voidaan määrittää korkeammalle kuin ohuessa teräslevyssä käytettävien ruuvien. Teräslevyn puristuslujuus on paljon suurempi verrattuna vanerin syitä vastaan kohtisuoraan puristuslujuuteen. Väliseinältä kohdistuvan pystysuuntaisen puristavan normaalivoiman vaikutus puristuskestävyyteen ei ole siis yhtä suuri teräslevyllä kuin vanerilla. Teräslevyn kiinnityksessä pyritään käyttämään vain liitospintoja vastaan kohtisuoria ankkurinaulaliitoksia. Teräslevyn reikien halkaisijat ovat suuremmat kuin naulojen halkaisijat. Tällä pyritään välttämään puun ja teräksen erilaisesta kosteus- ja lämpöteknisestä käyttäytymisestä syntyvää halkeilua.



Kuva 9. Kantavan CLT-väliseinän liitos LVL-välipohjaan teräslevyllä.

2.4 Kitka vaakaliitosten mitoituksessa

Kitkavoimaa ei ole vielä toistaiseksi huomioitu puurakenteiden virallisissa suunnitteluohjeissa. Eurokoodin 5 osassa 1-1, jossa määritetään puurakenteiden suunnittelua koskevat yleiset ja rakennuksia koskevat säännöt (SFS-EN 1995-1-1), ei mainita erillisiä ohjeita kitkavoiman hyötykäytöstä massiivipuuelementtiseiniä vaakaliitoksissa. Itävallan puuteollisuuden liitto proHolz Austria on julkaissut vuonna 2014 käsikirjan CLT-elementtien suunnittelusta Eurokoodin mukaisesti (Wallner-Novak et al. 2014). Käsikirjassa esitetään, että vaakasuuntaisia leikkausvoimia vastaan jäykistävien seinien kiinnittämiseen tarvittavasta voimasta voidaan vähentää 90% pysyvistä pystykuormista aiheutuvan liukukitkan suuruinen vaakavoima kaavan (1) mukaisesti.

$$Q_{Ed} \leq F_{R,d} \quad (1)$$

missä $Q_{Ed} \leq F_{H,d} - 0,9 \cdot \mu_k \cdot G_k$ on leikkausvoima liitoksessa
 $F_{H,d}$ on seinään vaikuttava vaakavoima [N]
 μ_k on liukukitkakerroin [-]
 G_k on seinään vaikuttavien pysyvien pystykuormien resultantin ominaisarvo [N]
 $F_{R,d}$ on valittujen liittimien kestävyysmitoitussarvo [N]

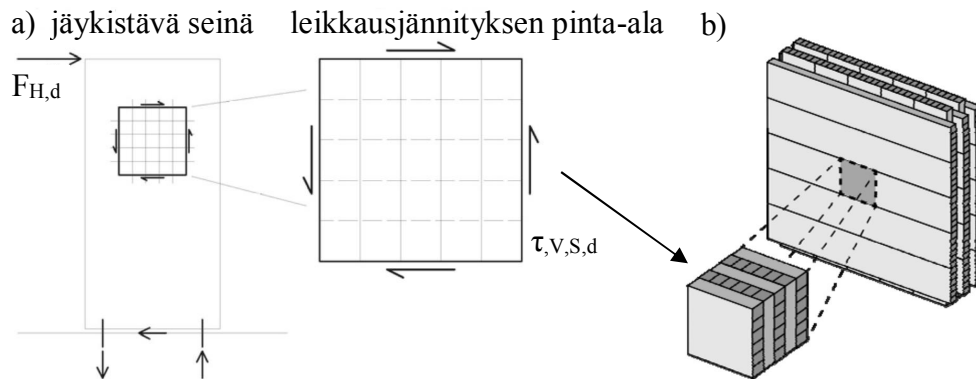
ProHolz Austria antaa CLT-käsikirjassaan puu-puuliitoksille liukukitkakertoimeksi 0,2...0,5 välille, joista 0,4 on suositeltu arvo. Arvot perustuvat saksalaisten insinöörien liiton VDI:n maantiejoneuvojen kuormien sidontastandardiin (Wallner Novak et al., s.137). Vastaava yleiseurooppalainen standardi antaa taas puun välisten pintojen kitkakertoimiksi puutavaran laadusta riippuen 0,3 tai 0,45. Standardin mukaan 0,2 suurempaa kitkakertoimen arvoa ei saa käyttää, jos kontaktipintoja ei ole pyyhitty puhtaaksi lumesta ja jäästä (SFS-EN 12195-1, s. 74). Kuten kitkakertoimien arvoista voidaan nähdä, puupintojen väliset kitkakertoimet asettuvat laajalle välille. Tästä syystä tämän diplomityön luvussa 5 kitkavoiman suuruutta on selvitetty massiivipuutuotteilla kokeellisesti.

Puukerrostalojen omapaino on suhteessa hyötykuormaan paljon pienempi kuin betonirunkoisissa kerrostaloissa. Hyötykuormaa ei voida hyödyntää rakennusta stabiloivana kuormana, sillä hyötykuorma on luonteeltaan muuttuvaa kuormaa. (Junttila 2015). Jussi Junttila (2015) tutki diplomityössään FEM-laskennan avulla kahdeksankerroksisen puukerrostalon CLT-tilaelementtien ja elementtien ääneneristykseen käytetyn polyuretaanikaistan välistä kitkaa, ja kitkan hyödyntämistä jäykistävien seinien leikkausvoimien välittämisessä. Tutkimuksessa huomattiin, että kerrostalon rakennemalli petti rakennukseen kohdistuvien vaakavoimien johdosta sen keskivaiheilta. Mallin alemmissa kerroksissa normaalivoima oli tarpeeksi suuri vaakavoimiin nähden yläpuolisten kerrosten omapainojen vuoksi. Ylemmissä kerroksissa vaakaliitosten tuulikuormien kertymä oli suhteellisen pieni.

Junttilan (2015) tutkimuksen tulosten perusteella kitkaliitoksen pettämistapa on hauras. Kitkaliitoksessa tulisi olla riittävä määrä teräskiinnikkeitä, jotta murtumistapa olisi sitkeämpi. Junttila toteaa, että kahdeksankerroksinen puukerrostalo on kitkaliitoksen ja kokonaisvarmuuden kannalta haastava kohde, koska vaakakuormat kasvavat suuriksi ja rakennuksen omapaino on näihin kuormiin nähden suhteellisen pieni. Tutkimuksessa todetaan, että kitkaliitos toimii paremmin, mitä matalampi rakennus on kyseessä.

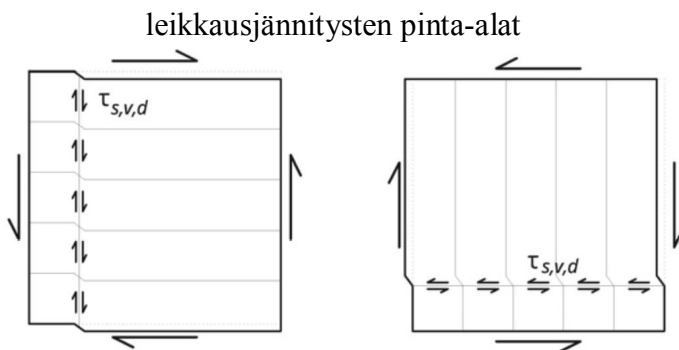
2.5 Massiivipuuseinäelementtien mitoitus leikkaukselle

Rakennusten vaakavoimat muodostavat leikkausjännityksiä kantaviin väliseiniin, ja niiden leikkauslujuuden tarkastelu on siitä syystä oleellinen murtorajatilatarkastelun osa-alue. Pro-Holzin CLT-käsikirjassa (Wallner-Novak et al. 2014) on esitetty kolme eri leikkausmurtomekanismia, jotka perustuvat Bogensperger et al. (2010) CLT-seinäelementtien leikkauslujuuden tutkimuksiin. Tässä luvussa esitettävät tarkastelut on määritetty CLT-seinäelementeille, mutta samoja mitoitusperiaatteita voidaan soveltaa kerrannaisliimatuille LVL-seinille. Kuva 10:ssä on esitetty, miten leikkausjännitys syntyy, kun vaakavoima vaikuttaa jäykistävän seinän yläosassa.



Kuva 10. a) Vaakavoiman $F_{H,d}$ aiheuttama leikkausjännitys jäykistävässä seinässä ja b) CLT-levyn tarkasteltava leikkausjännityselementti kolmiulotteisena (Wallner-Novak et al. 2014; Bogensperger et al. 2010).

Murtomekanismissa 1 seinälevy murtuu lamellikerroksen lautojen leikkauslujuuden ylittyessä Kuva 11:n mukaisesti. Yksittäisen lamellikerroksen leikkauslujuus määritetään kaavalla (2). Jos CLT-seinäelementtiin kohdistuu lokaaleja kuormituksia, murtomekanismi 1 saattaa tapahtua rolling shear -lujuuden eli poikittaisen kerroksen tasoleikkauslujuuden ylityessä. Rolling shear -jännitys ilmenee liimatuissa nivelissä niiden lamellikerrosten välillä, joihin kuorma on kohdistuu. (Wallner-Novak et al. 2014.) CLT:n rolling shear -lujuuden $f_{R,k}$ ominaisarvona käytetään $1,25 \text{ N/mm}^2$ kuusi- tai pihtalaudoista tehdyille elementeille (Kevarinmäki 2014).

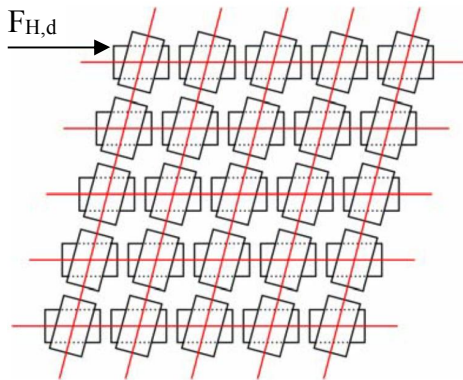


Kuva 11. Murtomekanismi 1: lamellikerroksessa tapahtuva leikkausjännitys (Wallner-Novak et al. 2014).

$$\tau_{V,S,d} \leq \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot f_{V,S,k} \quad (2)$$

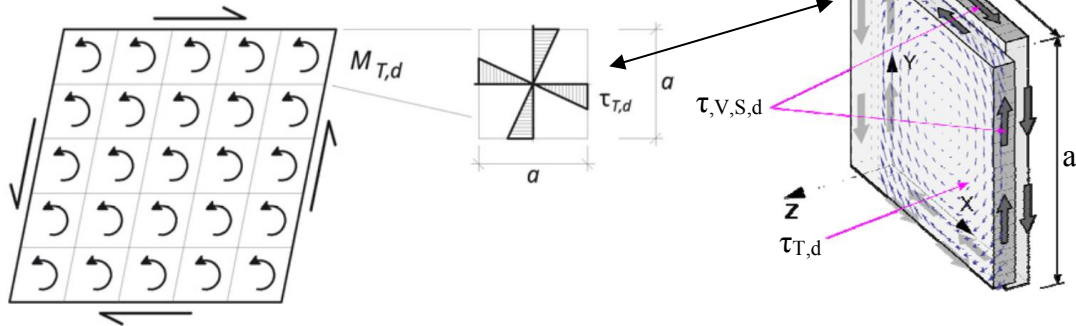
missä $\tau_{V,S,d} = \frac{Q_{Ed}}{A_{S,net}}$ on lamellikerroksen lautojen leikkausjännitys [N/mm²]
 $A_{S,net} = \min \begin{cases} A_{0,net} \\ A_{90,net} \end{cases}$ on ristikkäisten lamellikerrosten lautojen poikkipinta-ala [mm²]
 $f_{V,S,k}$ on lamellikerroksen lautojen ominaisleikkauslujuus [N/mm²]
 k_{mod} on muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman kesto ja puun kosteuspitoisuus [-]
 γ_M on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku [-]

Murtomekanismissa 2 seinäelementti murtuu lamellikerrosten välisten liimauksen vääntöleikkausjännityksen ylittymisestä. Tämän murtomekanismin lokaali jännitysten uudelleenjakautuminen aiheutuu lokaalista vääntömomentista, joka vaikuttaa liimattujen lamellikerrosten rajapintojen molemmilla puolilla. Lokaalit vääntömomentit syntyvät Kuva 10:n vaakavoiman $F_{H,d}$ aiheuttamasta leikkausmuodonmuutoksesta. Murtomekanismin 2 leikkausmuodonmuutos on esitetty Kuva 12:ssa. Mitoitustilanteessa seinäelementti jaetaan risteyskenttiin niistä kohdista, joissa vierekkäisten lamellikerrosten laudat koskettavat toisiaan (Kuva 13). (Bogensperger et al. 2010.) Seinäelementtien vääntöleikkausjännitystarkastelu tehdään kaavan (3) mukaan. CLT:n risteävien lautojen välisen liimasauman vääntöleikkauslujuudelle $f_{v,T,k}$ käytetään arvoa 2,5 N/mm² (Kevarinmäki 2014).



Kuva 12. Vaakavoimasta aiheutuvien lokaalien vääntömomenttien aiheuttama leikkausmuodonmuutos toisia vastaan kohtisuorien lamellipintojen välillä (Bogensperger et al. 2010).

leikkausjännityksen pinta-ala



Kuva 13. Murtomekanismi 2: liimattujen pintojen lokaali vääntöleikkausjännitys risteyskentissä (Wallner-Novak et al. 2014).

$$\tau_{T,d} \leq \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot f_{V,T,k} \quad (3)$$

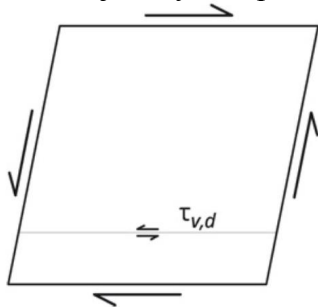
missä

$$\tau_{T,d} = \frac{M_T}{n_k \cdot I_p} \cdot \frac{a}{2}$$

on vääntöleikkausjännitys [N/mm²]
 M_T on leikkausvoiman aiheuttama vääntömomentti nivelessä [Nmm]
 I_p on polaarinen jäyhyysmomentti [mm⁴]
 $n_k = n_s \cdot n_f$ on liimattujen pintojen lukumäärä [-]
 n_s on liimattujen nivelten lukumäärä kerrosten välillä, jotka ovat kohtisuoraan toisiinsa nähden [-]
 n_f on risteyskenttien lukumäärä [-]
 a on risteyskentän sivun pituus [mm]
 $f_{V,T,k}$ on lautojen välisen liimasauman vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo [N/mm²]

Murtomekanismissa 3 tarkastellaan koko seinäelementin leikkauslujuuden ylittymistä Kuva 14:n mukaisesti. Vaadittu tarkastelu suoritetaan kaavan (4) perusteella.

leikkausjännityksen pinta-ala



Kuva 14. Murtomekanismi 3: koko seinäelementin leikkausmurto (Wallner-Novak et al. 2014).

$$\tau_{V,d} \leq \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot f_{V,k} \quad (4)$$

missä $\tau_{V,d} = \frac{Q_{Ed}}{A_{\text{brutto}}}$ on koko seinäelementin leikkausjännitys [N/mm²]

A_{brutto} on seinäelementin poikkileikkauksen bruttopoikkipinta-ala [mm²]

$f_{V,k}$ on CLT:n ominaisleikkauslujuus [N/mm²]

2.6 Massiivipuuseinäelementtien vaakaliitosten mitoitus

2.6.1 Vaneri-CLT-lapepinta-liitos

Kuten luvussa 2.3.3 esitettiin, kahden CLT-väliseinäelementin detaljissa vanerin kiinnittämiseen käytetään ankkurinauloja. EN 1995-1-1 (2014) mukaan naulojen leikkauskestävyyden mitoitusarvon laskemiseksi yksileikkeisen liitoksen puuosille tulisi määrittää reunapuristuslujuuden $f_{h,k}$ ja naulan ulosvetokestävyyden $F_{ax,Rk}$ ominaisarvot. Blass ja Uibel (2006) ovat tutkineet ja määrittäneet CLT:n lapepintaa vastaan kohtisuoraan kiinnitetyille nauloille CLT:n reunapuristuslujuuden. Blass ja Uibelin tutkimuksen reunapuristuslujuutta voi kuitenkin käyttää vain CLT-levyille, joiden lamellien paksuus on 7 mm tai vähemmän. Blass ja Uibel (2007) ovat lisäksi määrittäneet vain itseporautuville ruuveille ulosvetokestävyyden ominaisarvon, jota ei voida hyödyntää muille CLT:n kiinnityksissä käytettäville metallisille puikkotyypisille liittimille. Koska CLT-levyjen lapepintojen naulaliitoksiin ei ole tällä hetkellä hyväksyttyjä mitoitusohjeita, tulee vanerin ja CLT:n välisen naulaliitoksen leikkauskestävyys määrittä RIL 205-1-2017 (Kevarinmäki 2017) yksinkertaistetulla, varmalla puolella olevalla kaavalla tai kokeellisesti, kuten luvussa 1 esitetyn Wood Cityn kohteissa.

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot k_l \cdot R_k \cdot \min \left\{ 1, \frac{t_2}{12 \cdot d} \right\} \quad (5)$$

missä k_{mod} on muunnoskerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman kesto ja puun kosteuspitoisuus [-]

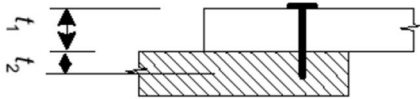
γ_M on materiaaliominaisuuden osavarmuusluku [-]

k_l on puulevyn materiaalista riippuva kerroin, joka lasketaan koivuvanerille kaavalla (6) [-]

R_k on yksittäisen naulan ominaisleikkauskestävyys, joka on sekä esiporaamattomille että esiporatuille nauloille $R_k = 120 \cdot d^{1,7}$ [N]

t_2 on Kuva 15 mukainen yksileikkeisen liitoksen naulan kärjenpuoleinen tunkeuma, jonka tulee olla vähintään $8 \cdot d$ [mm]

d on naulan paksuus, joka saa olla vaneria käytettäessä enintään $0,5 \cdot t$ [mm]



Kuva 15. Yksileikkeisen liitoksen paksuuksien määrittely. Vaalea osa on kiinnitettävä levy ja rasteroitu osa puutavara, johon levy kiinnitetään (SFS-EN 1995-1-1).

$$k_l = \left(0,6 + \frac{t}{9 \cdot d} \right) \cdot k_\rho \quad (6)$$

missä t on vanerilevyn paksuus [mm]

k_ρ on puutavaran ominaistiheydestä ρ_k riippuva kerroin, joka on $\sqrt{\frac{\rho_k}{350 \text{ kg/m}^3}}$
[-]

2.6.2 Teräslevy-LVL-lapepinta- ja teräslevy-CLT-lapepinta-liitos

Tässä alaluvussa esitetään lukujen 2.3.1, 2.3.2 ja 2.3.4 detaljien tehtävät liitostarkastelut. Seuraavat tarkastelut ja mitoitusparametrit soveltuvat vain edellä mainittujen lukujen mukaisiin LVL:n ja CLT:n lapepintaan tehtyihin naulattuihin teräslevyliitoksiin. Mitoitus tehdään RIL 205-1-2017:ssä (Kevarinmäki 2017) annettujen ohjeiden mukaan. Näissä liitoksissa naulan leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavalla:

$$R_d = \frac{k_{\text{mod}}}{\gamma_M} \cdot k_s \cdot R_k \quad (7)$$

missä k_s on liittimen tunkeumaan vaikuttava kerroin, joka lasketaan kaavan (8) mukaan tunkeuman ollessa viilupuussa $t_2 = 8 \cdot d \dots 12 \cdot d$ ja kaavan (9) mukaan tunkeuman ollessa $t_2 \geq 12 \cdot d$ [-]

Kerroin k_s lasketaan jommallakummalla kaavalla:

$$k_s = \begin{cases} \left(0,2 + 0,9 \cdot \frac{t_2}{12 \cdot d} \right) \cdot k_\rho & \text{ohuella teräslevyllä } t_t \leq 0,5 \cdot d \\ \left(0,6 + 0,9 \cdot \frac{t_2}{12 \cdot d} \right) \cdot k_\rho & \text{paksulla teräslevyllä } t_t \geq d \end{cases} \quad (8)$$

$$k_s = \begin{cases} 1,1 \cdot k_\rho & \text{ohuella teräslevyllä } t_t \leq 0,5 \cdot d \\ 1,5 \cdot k_\rho & \text{paksulla teräslevyllä } t_t \geq d \end{cases} \quad (9)$$

missä k_ρ on puutavaran ominaistiheydestä ρ_k riippuva kerroin, joka on $\sqrt{\frac{\rho_k}{350 \text{ kg/m}^3}}$
[-]
 t_t on kiinnitettävän teräslevyn paksuus [mm]

Paksun teräslevyn käyttö edellyttää, että teräkseen poratun reiän halkaisija on enintään $1,1 \cdot d$. Ankkuri- tai kierrenaulan yhteydessä voidaan käyttää paksun teräslevyn kaavoja teräslevyn paksuuden ollessa $0,5 \cdot d \leq t_i \leq d$, kun naulan kartio-osan pituus on vähintään d , leveys kannassa vähintään $1,3 \cdot d$ ja kartio-osa pureutuu tiiviisti kiinni teräslevyn reikään. Nauloille on esiporattava reiät, jos puutavaran ominaistiheys $\rho_k \geq 500 \text{ kg/m}^3$, naulan paksuus $d > 6 \text{ mm}$ tai puutavaraosan paksuus $t_2 < 7 \cdot d$ (Kevarinmäki 2017, s.113). LVL by Stora Enson X-laadun ominaistiheys on 480 kg/m^3 ja CLT:n noin 470 kg/m^3 , joten materiaalit eivät itsessään edellytä esiporattavia reikiä nauloille (Stora Enso 2017; Stora Enso 2015a).

Luvun 2.3.4 detaljin teräslevyn tai kulmaraudan ja ripalaatan LVL-pintalaatan lapepinnan välisen liitoksen oleellinen murtomekanismi on palalohkeaminen. Palalohkeamistarkastelua ei tarvitse suorittaa, jos liitos on esiporaamaton, peräkkäisten naulojen lukumäärä syysuunnassa on enintään neljä tai naulaliitoksen kestävyys on mitoitettu ohuen teräslevyn tapauksessa kaavojen (8) ja (9) avulla. LVL:n teräslevyllisen lapeliitoksen palalohkeamiskestävyyden ominaisarvo on

$$F_{ps,k} = L_{net,t} \cdot (t_{ef} \cdot f_{t,0,k} + (a_3 + (n_1 - 1) \cdot a_1) \cdot f_{v,0,k}) \quad (10)$$

missä $L_{net,t} = (n_2 - 1) \cdot (a_2 - D) \text{ [mm]}$

$t_{ef} = \frac{R_k}{d \cdot f_{h,0,k}}$, missä X-laadun LVL:n reunapuristuslujuus

$f_{h,0,k} = 37 \cdot (1 - 0,01 \cdot d) \text{ [N/mm}^2\text{]}$

D on ruuville puuhun poratun reiän halkaisija [mm]

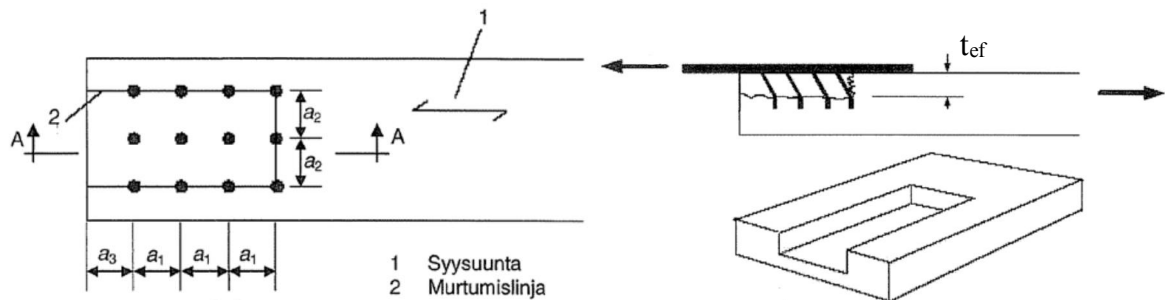
$f_{t,0,k}$ on LVL:n vetolujuus ilman kokonaisvaikutuskorjausta [N/mm²]

$f_{v,0,k}$ on LVL:n tasoleikkauslujuus lappeellaan syiden suuntaan [N/mm²]

n_1 on liitinrivien lukumäärä viilupuun syysuunnassa [-]

n_2 on liitinrivien lukumäärä viilupuun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa [-]

$a_1 \dots a_3$ tulevat Kuva 16:n mukaan [mm]



Kuva 16. LVL-levyn palalohkeaminen (Kevarinmäki 2017).

Teräslevyliitosten suunnittelussa on otettava huomioon puun syitä vastaan kohtisuora kuivumiskutistuminen (Kevarinmäki 2017). Kaikkien puun mekaanisten liitosten jäykkyys ja mahdollisesti myös lujuus alenee puun kosteusvaihtelun takia. Puu halkeaa helposti, jos sen kosteusmuodonmuutokset estetään lujalla ja jäykällä kiinnityksellä. Käytettäessä metallisia

liitoselimiä, jotka eivät seuraa puun kosteusmuodonmuutoksia, on liittimien väliset etäisyydet ja liitoskappaleiden leveys kohtisuoraan puun syysuuntaan nähden pidettävä pieninä tai tehtävä liitoskappaleessa olevat liittimien reiät soikeiksi liikkeen mahdollistamiseksi. (Vuorinen & Jantunen 1997, s.21.) Naulojen leikkauslujuus ei muutu puun kuivumisesta. Kun puu kuivuu, liitettävien kappaleiden väliin syntyy rako, joka pienentää liitoksen lujuutta ja jäykkyyttä. Naulaus olisi pyrittävä tekemään siinä kosteustilassa, johon liitoksen oletetaan joutuvan kuormitettuna. (Vuorinen & Jantunen 1997, s.27.)

2.6.3 Teräslevy-CLT-syrjäpinta-liitos

Tässä luvussa esitettävät tarkastelut tehdään luvun 2.3.4 detaljin teräslevyn ja CLT-väliseinäelementin väliselle liitokselle. Detaljin teräslevyn ruuvikiinnityksen leikkauskestävyys voidaan mitoittaa varmalle puolelle kaavan (7) mukaan. Jos CLT-elementin syrjäpinnan ruuviliitoksen kestävyys halutaan määrittää tarkemmin EN-1995-1-1 luvun 8.2.3 kaavojen avulla, Blass ja Uibel (2007) ovat määrittäneet CLT:n syrjäpinnalle reunapuristuslujuuden ominaisarvon, kun käytetään täyskierteisiä, itseporautuvia ruuveja. CLT-elementin syrjäpinnan reunapuristuslujuus on seuraava

$$f_{h,k} = \frac{20}{\sqrt{d}} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (11)$$

missä d on ruuvin paksuus [mm]

Ehtona kaavalle (11) on, että ruuvien paksuus on vähintään 8 mm ja ruuvin tunkeuma CLT:ssä on vähintään kymmenen kertaa ruuvin paksuus. CLT:n syrjäpinnan ruuviliitoksen ruuvien tehollinen lukumäärä on $n^{0,85}$, missä n on liitoksessa yhdessä toimivien ruuvien lukumäärä.

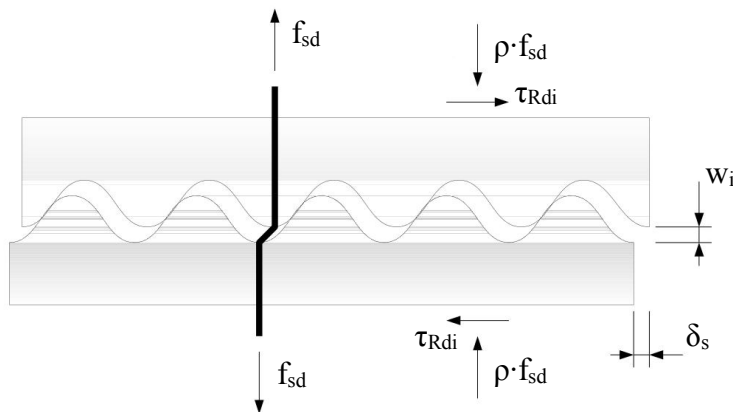
2.7 Vaakasuuntaisten leikkausvoimien ankkurointi muilla materiaaleilla

Massiivipuulementtien välisten kitkaliitosten toimintaperiaatteen ymmärtämiseksi, on hyödyllistä käsitellä kitkan luonnetta, merkitystä ja hyödyntämistä samaan tarkoitukseen tehdyillä rakennustuotteilla kuten betonielementeillä. Kitkan hyödyntäminen betonielementtirakentamisessa ja vaakasuuntaisten leikkausvoimien ankkuroinnissa on hyväksytty yleisesti betonirakenteiden suunnitteluohjeissa ja -normeissa. Tästä syystä betonielementtien vaakaliitosten suunnitteluperusteisiin on hyödyllistä perehtyä, jotta muodostuu käsitys vaakasuuntaisen kitkaliitoksen toiminnan periaatteesta saman tyyppisellä, eri materiaalilla tehdyllä liitoksella.

Muun muassa betonirakenteen valmistustavan vuoksi betonirakentamisessa muodostuu liittymäpintoja. Muiden voimavaikutusten lisäksi liittymäpintoissa esiintyy leikkausta, joissa voi kehittyä liukumistyyppinen murtuminen. Leikkausvoima voi siirtyä osasta toiseen vain pintojen vaarnavaikutuksena tai liittymässä olevien terästen vaarnavaikutuksena. Pintojen vaarnavaikutus edellyttää, että liitoskappaleiden välille on muodostunut riittävä tartuntalujuus. Leikkauspintojen läpi tulee olla poikittainen rauditus, joka estää halkeaman avautumisen betonissa, ja joka ottaa osan leikkausvoimasta omana vaarnavaikutuksena. Laskennassa liittymiä tarkastellaan aina halkeilleen olomuodon mukaisena. Betonielementtien välisen työsauman betonin vetolujuus on pieni ja siitä syystä elementtien välistä työsaumaa

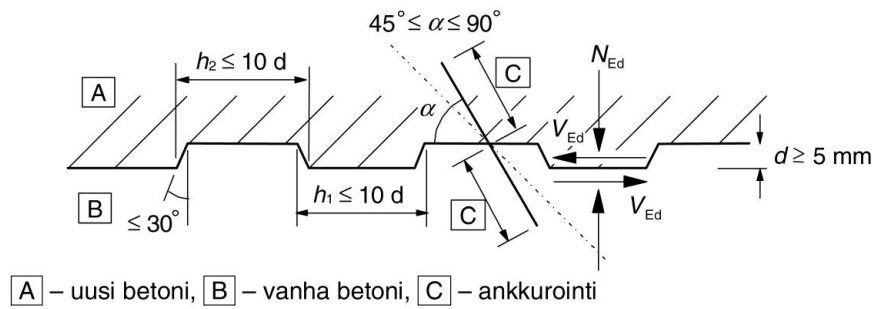
voidaan käsitellä haljenneen betonin liitoksena. (Leskelä 2006, s.274, 280.) Halkeilleen betonin liitosta voidaan käsitellä kahdella eri mallilla: leikkauskitkamallilla ja kiviainesrakeiden vaarnamallilla. Tässä työssä käsitellään kuitenkin tarkemmin leikkauskitkamallia. Syy tähän on se, että useiden kansainvälisten betonimitoitussuostojen, kuten Eurokoodi 2:n, eri aikaan valettujen betonien rajapintojen välisten pitkittäisleikkauslujuuksien mitoitusyhtälöt perustuvat juuri tähän malliin (Santos 2009).

Leikkauskitkamallissa leikkausvoiman välittyminen voidaan ajatella perustuvan haljenneessa liittymässä mallin nimen mukaisesti leikkauskitkaan (Leskelä 2006, s.277). Leikkauskitkateoria olettaa, että leikkausvoimien siirtomekanismi betoni-betonirajapinnassa yhtäaikaisen leikkaus- ja puristusvoiman alaisuudessa on varmistettu vain kitkan avulla. Yksinkertaisella saha-aaltomallilla voidaan havainnollistaa leikkauskitkateorian periaatteita (Kuva 17). Sekä rajapinnan ylittäminen leikkausraudoituksella että leikkaustason normaalijännitysten vaikutus otetaan mallissa huomioon. Betoni-betonirajapinnan leikkauslujuus voidaan määrittää kolmen eri kuorman kantomekanismin yhteisvaikutuksella: adheesiolla, leikkauskitkalla ja leikkausraudoituksella. Adheesio-osa on peräisin kemiallisesta sidoksesta vanhan ja uuden betonin hiukkasten välillä. Kun maksimi kuormituskyky saavutetaan, betoni-betonirajapinnassa tapahtuu murtuminen ja leikkausjännitys siirtyy mekaanisen lukituksen avulla. Jos rajapinta on puristuksen alaisena, leikkausjännitykset siirtyvät leikkauskitkan avulla. Betoniosien välillä suhteellisen siirtymän kasvaessa leikkausraudoitus, joka ylittää rajapinnan, venyy ja mahdollisesti myötää. Siksi leikkausraudoitus aiheuttaa puristusta rajapinnassa ja leikkausvoima siirtyy kitkan siirrettäväksi. Ilmiötä kutsutaan usein vaarnavaikutukseksi. (Santos 2009.)



Kuva 17. Leikkauskitkamalli, jossa w_i ja δ_s ovat pysty- ja vaakasuuntainen siirtymä (Santos 2009).

Eurokoodi 2:n osassa 1-1 (2015) määritetään, että betonipinnat luokitellaan joko hyvin sileiksi, sileiksi, karheiksi tai vaarnatuiksi, jos pinnoista ei ole olemassa tarkempaa tietoa. Kolme ensimmäistä pintatyyppiä saadaan valmistamalla betonipinta halutulla karkeudella. Vaarnatun pinnan tulee mukailla Kuva 18:n hammastusta ja mittoja. Hyvin sileä pinta on pinta, joka on valettu teräs-, muovi- tai erikoiskäsiteltyä puumuottia vasten. Sileä pinta on liukuvalettu pinta, ekstruuder- eli suulakepuristinpinta tai tärytyksen jälkeen jälkikäsittelemättä jätetty vapaa pinta. Karhea pinta on pinta, jolla on vähintään 3 mm karheus noin 40 mm välein. Karheus saavutetaan urituksella, paljastamalla kiviaines tai muilla menetelmillä, joilla saavutetaan vastaava pinnan ominaisuus.



Kuva 18. Eurokoodi 2:n osan 1-1 mukainen vaarnattu työsauma (SFS-EN 1992-1-1).

Jokaiselle pintatyypille on määritetty Eurokoodi 2:n osassa 1-1 (2015) kaksi eri kerrointa, koheesio- ja kitkakerroin, joita käytetään eri aikaan valettujen betonien rajapinnan leikkausvoiman ennusteeseen. Nämä kertoimet on esitetty Taulukko 1:ssä. Jos kuormat ovat väsyttäviä tai dynaamisia, taulukon koheesiokertoimien arvot puolitetaan (SFS-EN 1992-1-1). Työsauman lujuuteen vaikuttavat monet tekijät. Kun betoni tarttuu työsaumaan kunnolla ja työsauma on tarpeeksi raudoitettu, pystyy työsauma kehittämään leikkauskestävyyden, joka on suurempi kuin taivutetun rakenteen leikkauskestävyys. Jos saumavalu ei tartu vanhaan betoniin, tuottaa se saumaan noin kaksinkertaisen alkuliukuman verrattuna saumaan, jonka tartunta pystyy välittämään leikkausvoimaa. Pienen karheuden omaavat hierretyt liittymäpinnat aiheuttavat tartuntamurtumisen halkeaman ilmestyttyä. Työsauman, kun se on suunniteltu ja toteutettu oikein, murtumisen leikkautumistaso on todennäköisesti työsauman alapuolella olevassa betonikerroksessa. Tämä johtuu siitä syystä, että vanhan betonin yläpinta on lajittunutta ja sen lujuus on pienempi kuin uuden betonin. (Leskelä 2006, s.280.) Työsauman leikkauskestävyyden mitoitusarvo määritetään Eurokoodi 2:ssa seuraavalla kaavalla:

$$\tau_{Rdi} = c \cdot f_{ctd} + \mu_v \cdot \sigma_n + \rho \cdot f_{sd} \cdot [\mu_v \cdot \sin(\alpha) + \cos(\alpha)] \quad (12)$$

missä

- c on pintatyypistä riippuva koheesiokerroin [-]
- f_{ctd} on betonin vetolujuuden mitoitusarvo [N/mm^2]
- μ_v on leikkauskitkakerroin [-]
- $\sigma_n = N_{Ed}/(b \cdot s)$, joka on rajapintaan vaikuttava ulkoisesta normaalivoimasta johdettu pienin mahdollinen normaalijännitys [N/mm^2]
- N_{Ed} on ulkoinen normaalivoima [N]
- $\rho = A_s/(b \cdot s)$, joka on liittymäpinnan suhteen laskettu raudoitussuhde [%]
- A_s on liittymän pituudella s oleva leikkausraudoituksen poikkileikkausala [mm^2]
- b on liittymän leveys [mm]
- s on liittymän pituus [mm]
- f_{sd} on leikkausraudoituksen mitoituslujuus [N/mm^2]
- α on leikkausraudoituksena toimivan ankkurointiteräksen kulma leikkausta-soon nähden [$^\circ$]

Työsauman leikkauskestävyyden mitoitusarvon τ_{Rdi} saa olla korkeintaan $0,5 \cdot v \cdot f_{cd}$ suuruisen, missä f_{cd} on betonin puristuslujuuden mitoitusarvo ja v on EN 1992-1-1 kohdan 6.2.2 (6) mukainen lujuuden pienennyskerroin. τ_{Rdi} tulee olla vähintään yhtä suuri tai suurempi kuin rajapinnassa vaikuttavan leikkausjännityksen mitoitusarvon, joka määritetään alla olevalla kaavalla

$$\tau_{Edi} = \beta \cdot \frac{Q_{Ed}}{z \cdot b} \quad (13)$$

missä β on uutta betonia olevan poikkileikkauksen jännitysresultantin ja koko poikkileikkauksen jännitysresultantin suhde joko puristus- tai vetoalueella, molemmat laskettuina samasta kohdasta [-]
 Q_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo [N]
 z on koko poikkileikkauksen sisäinen momenttivarsi [mm]

Kaavan (12) termi $\rho \cdot f_{sd}$ edustaa leikkautumistasoa vastaan kohtisuoraa puristusvoimaa, joka aiheutuu siitä, että raudoitus vastustaa halkeaman avautumista. Leikkauskitkateoria pitää hyvin paikkansa pienillä raudoitussuhteilla leikkauskestävyyden ollessa alhainen. (Leskelä 2006, s.278). Liittymäpinnan raudoitussuhteen ρ leikkausraudoituksen poikkileikkausalaan A_s saa laskea mukaan vain ne teräkset, jotka on ankuroitu liittymään molemmiin puolin mitoituslujuutta f_{sd} vastaavalle vetovoimalle. Näitä teräksiä ei saa käyttää samanaikaisesti ottamaan vastaan muita kuormituksia. Kohtisuoran jännityksen työsaumaa vastaan saa ottaa huomioon vain, kun jännitys on puristusta. Jos jännitys on vetävä, on leikkauskitkakerroin $\mu_v = 0$, sillä pintojen välistä kitkaa syntyy vain puristavan normaalivoiman alaisuudessa. (Leskelä 2006, s.281.)

Taulukko 1. Eurokoodi 2:n osassa 1-1 määritetyt koheesio- ja kitkakertoimet (SFS-EN 1992-1-1).

Pintatyyppi	Koheesiokerroin c (-)	Kitkakerroin μ_v (-)
Hyvin sileä	0,025...0,10	0,50
Sileä	0,20	0,60
Karhea	0,40	0,70
Vaarnattu	0,50	0,90

Eurokoodi 2 (2015) käyttää hyväksi betonin lujuutta implementoimalla vetolujuuden suoraan mitoitusyhtälöön ilmaistakseen koheesion ja puristuslujuuden osuuden, jotta leikkauslujuudelle voidaan määrittää yläraja. Normissa ei tosin huomioida pohjabetonin eikä lisätyn betonikerroksen vaikutusta. Tällä tavalla määritetty betonin lujuus mitoitusyhtälössä vastaa heikointa betonia, eli yleensä pohjabetonia, eikä molempia betonilujuuksia tai edes niiden yhdistelmää. (Santos 2009.)

Eurokoodi 2 erottelee pinnan karkeudet pinnan viimeistelymenetelmän funktiona. On kuitenkin korostettava, että Eurokoodi 2:ssa on omaksuttu laadullinen lähestyminen pintojen karkeuden suhteen. Lähestymistapa on helppo ja nopea suorittaa, mutta subjektiivinen tapa, sillä siihen vaikuttaa työmaatoteutus, laadunvarmistus sekä rakennusolosuhteet, ja on siitä syystä taipuvainen inhimilliseen virheeseen. Vaikka betonipinnan valmistus on suhteellisen yksinkertaista, on prosessi riippuvainen useista muuttujista kuten työntekijöiden taidoista, käytettävistä välineistä, valuajasta, betonin fyysisistä ja mekaanisista ominaisuuksista sekä monista muista asioista. On selvää, että vaikka vain yhtä edellä mainittua muuttujaa muutetaan, voidaan saavuttaa todella erilaisia pintatyyppejä. (Santos 2009.)

3 Pintojen välinen kitka

3.1 Pintojen karkeus

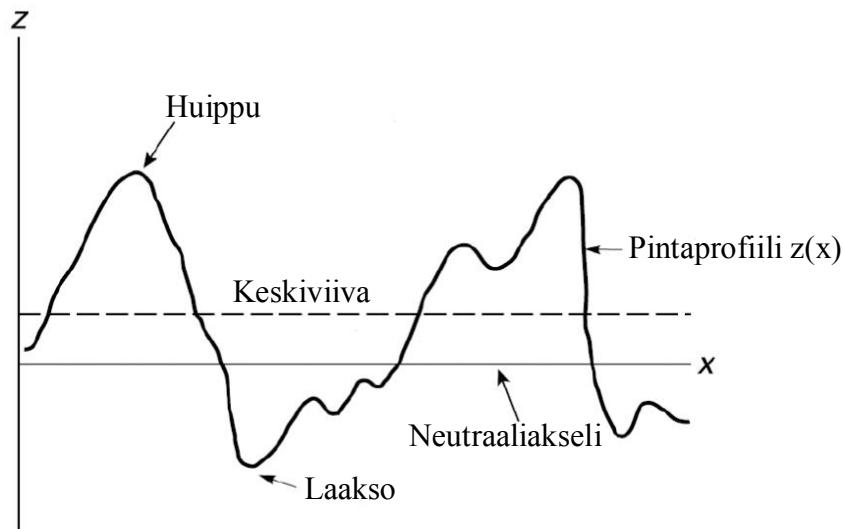
Mikään pinta ei ole koskaan täydellisen sileä. Jos pintoja tarkastellaan erittäin läheltä, pinnoilla voidaan nähdä loputon määrä karheushuippuja ja syvänteitä. (Ashby et al. 2007, s.231-232.) Voidaankin todeta, että lähes kaikkien tunnettujen materiaalien pinnat ovat karkeita. Huippujen ja syvänteiden vaihteluväli on insinöörimateriaaleilla noin 1 μm . Karkean pinnan sivuprofiili muotoutuu aina sattumanvaraisesti, ellei pintaa ole työstetty tarkoituksella säännölliseksi. (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.477.) Suurin osa insinöörimateriaalien pinnoista on sekoitus epäsäännöllisiä ja säännöllisiä pinnan muotoja. Muotoiltujen pintojen muodot ovat erittäin epäsäännöllisiä, mistä johtuen ne ovat koostumukseltaan karkeita. (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.480.)

Monet kitkan ja pintojen välisen kontaktin ominaisuuksista ovat tulosta pintojen karkeusominaisuuksista. Pintakarheus on toistuva tai sattumanvarainen hajonta nimellispinnasta, joka muodostaa kolmiulotteisen pinnan muodon. Pintakarheuden määritelmään kuuluvat karkeus (nano- ja mikrokärkeus), aaltomaisuus (makrokärkeus), näiden suunta sekä pinnan virheet. (Bhushan & Petralia 2013, s.90.)

Nano- ja mikrokärkeus muodostuvat pintaprofiilin vaihteluista lyhyillä aallonpituuksilla kuvaten huiput (lokaalit maksimit) ja laaksot (lokaalit minimi) vaihtelevilla amplitudeilla ja väleillä. Huiput ja laaksot ovat suuria verrattuna molekyyli-tason mittasuhteisiin. Aaltomaisuus kuvaa pinnan epätasaisuutta pidemmillä aallonpituuksilla ja siitä puhutaan makrokärkeutena. Karkeuden ja aaltomaisuuden suunta on pääpintamuodon pääsuunta, joka yleensä määritetään tuotantotavalla. Pinnan virheet ovat satunnaisia, ennustamattomia ja epätoivotuja häiriöitä pinnan rakenteessa. (Bhushan & Petralia 2013, s.90.)

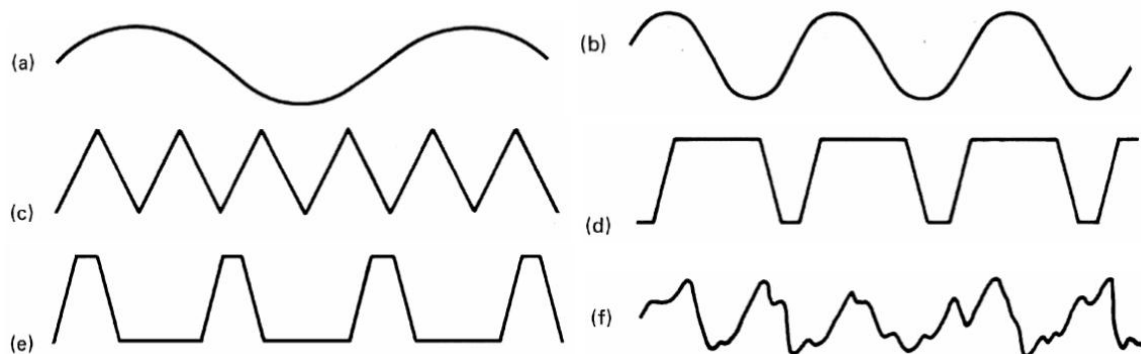
Pinnan karkeudella yleensä viitataan pinnan korkeuden muutokseen suhteessa referenssitason. Se mitataan yleensä yhtä käyräprofiilia tai joukkoa yhdensuuntaisia käyräprofiileita, eli pintakarttaa, pitkin. (Bhushan & Petralia 2013, s.92-93.) Yleensä ei ole siis mahdollista mitata jokaista huipun korkeutta, muotoa ja sijaintia kahdesta kontaktissa olevasta pinnasta kontaktin yksityiskohtien määrittämiseksi. Siitä syystä käytetään yksinkertaista pinnankärkeusmittaria mittaamaan ja esittämään pinnan rosoisuutta. Koska vain varsin pieni osa pinnasta voidaan mitata realistisesti, pinnankärkeusmittarin arvot eivät ole absoluuttisia. Näitä arvoja tulee käyttää vain suhteellisena tietona vertailutarkoituksiin. (Blau 1992, s.16-17.)

Perinteisesti pinnankärkeusmittarin analogista tulostetta arvioidaan profiilin poikkeamana keskilinjasta. Karkeuskeskiarvo R_a on pystysuuntainen keskipoikkeama keskiviivasta ja eniten Euroopassa yleisesti käytetty arvo. (Blau 1992, s.17.) Pintaprofiili määritetään funktiona $z(x)$, jonka profiilikorkeudet mitataan neutraaliakselista (Kuva 19). Pintaprofiilille määritetään keski- tai keskiarvoviiva, jonka pinta-ala profiilin ja keskiviivan yläpuolella on yhtä suuri kuin keskiviivan alapuolella. Karkeuskeskiarvo R_a on pystysuuntaisen hajonnan absoluuttisten arvojen aritmeettinen keskiarvo keskiviivasta profiilin läpi. Tyypilliset arvot metallien karkeusmittaukselle ovat 1,4 μm tarkasti sorvatulle pinnalle, 1,0 μm hiotulle pinnalle ja 0,2 μm kiillotetulle pinnalle (Blau 1992, s.17).



Kuva 19. Kaavio yleisestä kiinteän pinnan profilista $z(x)$ (Bhushan & Petralia 2013, s.93).

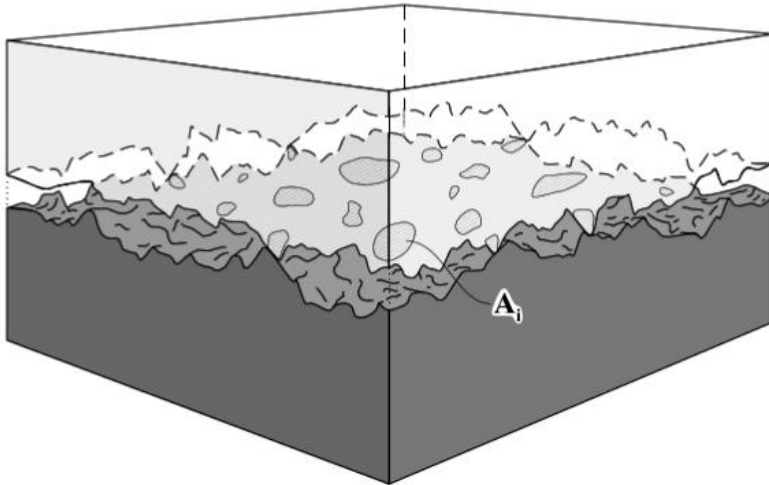
Toisaalta karkeuskeskiarvo nähdään koskettavan ensisijaisesti pinnan profiilin poikkeamia pystysuunnassa. Karkeuskeskiarvo ei tuota mitään tietoa pinnan kaltevuuksista, muodoista ja huippujen koosta tai niiden frekvenssistä ja säännönmukaisuudesta. On mahdollista, että laajasti vaihtelevilla pintojen profiileilla eri frekvensseillä ja eri muodoilla saadaan samoja karkeuskeskiarvon lukemia. (Bhushan & Petralia 2013, s.93, 95.)



Kuva 20. Erilaisia pintaprofiileja samalla karkeuskeskiarvolla R_a (Bhushan & Petralia 2013, s.96).

3.2 Kiinteiden pintojen välinen kontakti

Kahden pinnan kohdatessa pinnat koskettavat toisiaan vain pisteissä, missä pintojen karheushuiput kohtaavat. Normaalivoima F_n välittyy pinnoilta toisille siis vain kontaktissa olevien huippujen kautta. Pintojen oikea kontaktipinta-ala on todellisuudessa vain pieni murto-osa näennäisestä, nimellisestä kontaktipinta-alasta (Kuva 21). (Ashby et al. 2007, s.232-233.) Karheuden epäsäännöllisyyden vuoksi pinnat eivät lukkiudu toisiinsa kiinni. Tästä syystä todellinen kontaktipinta-ala voidaan jakaa useaan erittäin pieneen kontaktipinta-alaan. Jos normaalivoimaa F_n kasvatetaan, erittäin pienten kontaktipinta-alojen lukumäärä kasvaa uusilla erittäin pienillä kontaktipinta-aloilla. (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.494)



Kuva 21. Karheiden pintojen väliset todelliset kontaktipinta-alat (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.494).

Pintojen välinen kontaktipinta-ala A_r voidaan muodostaa seuraavalla kaavalla

$$A_r = \sum_{i=1}^n A_i \quad (14)$$

missä A_i on erittäin pieni, yksittäinen huippujen välinen kontaktipinta-ala
 n on erittäin pienten kontaktipinta-alojen lukumäärä

Ashby et al. (2007) mukaan tämä kontaktipinta-ala voidaan määrittää normaalivoima F_n :n ja myötölujuuden σ_y :n avulla. Karheushuippujen koskettaessa toisiinsa ensimmäisen kerran, ne muuttavat muotoaan elastisesti. Tosin jopa pienet kuormitukset voivat aiheuttaa niin suuria kosketusjännityksiä, että pintojen välillä tapahtuu plastisia muodonmuutoksia. Kontaktipisteet litistyvät muodostaen liittymäkohtia, joihin kontaktipinta-ala muodostuu. (Ashby et al. 2007, s.232-233.) Pintojen välinen kontaktipinta-ala A_r (Ashby et al. 2007) saadaan seuraavalla kaavalla

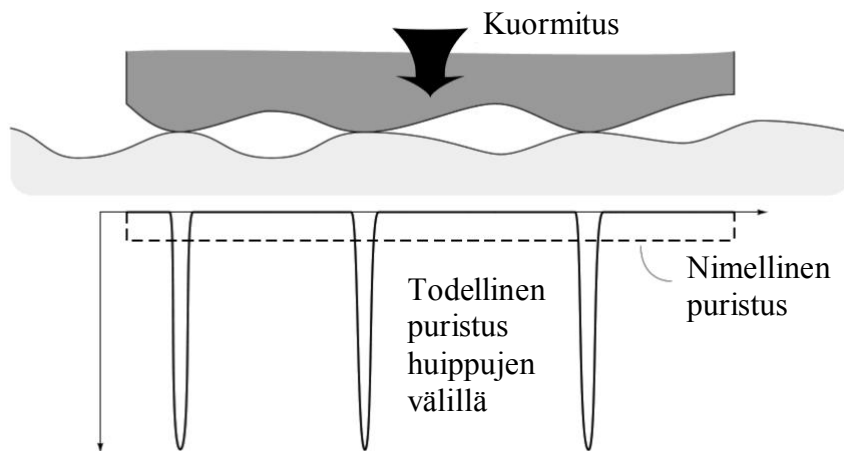
$$A_r = \frac{F_n}{\sigma_y} \quad (15)$$

missä F_n on kappaleeseen vaikuttava normaalivoima [N]
 σ_y on myötölujuus [N/mm²]

Bhushanin ja Petralian (2013, s.181) mukaan pinnan muodonmuutokset saattavat olla elastisia, plastisia, viskoelastisia tai viskoplastisia. Muodonmuutoksen tyyppiin vaikuttaa nimellinen normaali- ja leikkausjännitys, pinnan karheus ja materiaaliominaisuudet. Vaikka nimelliset jännitykset saattavat tapahtua elastisella alueella, paikalliset jännitykset saattavat ylittää elastisen rajan eli myötölujuuden. Näissä paikallisissa kohdissa kontaktipinnat myötävät plastisesti. Plastisen muodonmuutoksen tapahtumiseen vaikuttaa pinnan muodot ja kappaleen materiaaliominaisuudet (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.497). Useimmissa pintojen kontaktitilanteissa jotkut huiput muuttavat muotoaan elastisesti ja jotkut taas plastisesti. Yleisesti kuormitus aiheuttaa elastisia muodonmuutoksia kiinteissä kappaleissa, mutta

huippujen kärjissä, missä todellinen kontakti tapahtuu, lokaaleja plastisia muodonmuutoksia saattaa tapahtua. Stachowiakin ja Batchelorin (2014, s.494-495) esittävät, että todellisen kontaktipinta-alan välillä kosketusjännitykset ovat suuria, mutta lokaaleja plastisia muodonmuutoksia saattaa tapahtua vain joissain tapauksissa. Uusimpien tutkimusten mukaan suuri osa pintojen välisten kontaktien muodonmuutoksista on täysin elastisia. Todellisen kontaktipinta-alan ja kuormituksen välinen suhde on erittäin tärkeä, sillä se vaikuttaa suoraan kitkan ja kulumisen lakeihin.

Vaikka pinnan huiput muuttaisivat muotoaan plastisesti, todellinen kontaktiala on silti lineaarisesti verrannollinen kappaleeseen vaikuttavaan normaalivoimaan. Ehtona tähän on se, että kuormien suuruuksien tulee olla kohtalaisia. Suurien normaalikuormitusten tapauksessa todellinen kontaktiala saavuttaa raja-arvon, joka on lähellä, mutta vähemmän kuin näkyvä kontaktiala. (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.497).



Kuva 22. Puristusjännitys huippujen kohdalla on huomattavasti suurempi kuin pintojen nimellinen puristusjännitys (Stachowiak ja Batchelor 2014, s.494).

3.3 Adheesio

Adheesio on ilmiö, joka tapahtuu, kun kaksi pintaa painetaan yhteen, joko puhtaan normaalivoiman tai yhdistetyn normaali- ja leikkausvoiman avulla. Kun kahden erilaisen tai identtisen materiaalin pinnat tuodaan kiinteän tilan kontaktiin toistensa kanssa, kappaleiden pintojen sidos johtaa tarttuvan sidoksen muodostumiseen. Tätä kutsutaan yleisesti adheesioksi. Kontaktipintojen rajapinnan yli tapahtuva adheesio voidaan purkaa vetävällä normaalivoimalla, jota kutsutaan tartuntavoimaksi. (Bhushan & Petralia 2013, s.271.) Kiinteiden kappaleiden välinen adheesio syntyy atomien välisestä voimasta, joka syntyy rajapinnan yli. Nämä voimat voivat olla ainoastaan pintavoimia, jotka johtuvat pinta-atomeista itsestään. (Bhushan & Petralia 2013, s.316.)

Adheesio tapahtuu sekä kiinteä-kiinteäkontaktissa että kahden kiinteän kappaleen kontaktissa, joiden välissä on nestettä tai tahmeaa kiinteää ainetta. Jos kaksi kiinteää pintaa ovat puhtaina ja kaikki kemialliset kerrokset sekä adsorbaatit on poistettu, näiden kahden kiinteän pinnan välillä tapahtuu yleensä voimakas adheesio. Useissa tapauksissa pinnan epäpuhtaudet tai ohuet kerrokset pintojen välillä pienentävät adheesiota, tosin joissain tapauksissa adheesioreaktio saattaa olla vastakkainen. Pinnoissa, jotka on voideltu hyvin, adheesio on yleensä heikkoa. (Bhushan & Petralia 2013, s.271.)

Kahden pinnan ollessa yhdessä, todellinen kontaktipinta-ala on yleensä paljon pienempi kuin näkyvä pinta-ala pintojen karheuden vuoksi. Adheesio suuruuteen vaikuttaa todellinen kontaktipinta-ala, jonka kokoon vaikuttaa normaalivoima ja pintojen karheus sekä niiden mekaaniset ominaisuudet. Materiaaleilla, joilla on korkea karheus, kimmokerroin, kovuus tai sitkeyden puute, on pienempi todellinen kontaktipinta-ala, mikä johtaa matalampaan adheesioon. Mikä tahansa viskoelastinen tai viskoplastinen muodonmuutos, kuten viruma, nostaisi todellista kontaktipinta-alaa kontaktin keston funktiona, joka johtaisi adheesio nousuun. Tämä johtaisi adheesio nousuun. Nesteet, joilla on pieni kontaktikulma tai jotka ovat kosteita, kuten vesi, kondensoituvat höyrystä täysin nesteeksi pintojen päälle. Kapillaaritiivistymien nestekerrosten olemassaolo tai aikaisemmin pintojen välillä ollut kerros voi nostaa huomattavasti kiinteiden kappaleiden välistä adheesiota. (Bhushan & Petralia 2013, s.273-275, 316.)

Jotkut kitkan tutkijat ovat adheesio olemassaolon kannalla, kun taas toiset kiistävät adheesioon perustuvat mallit. Adheesio vastustajat perustavat väitteensä sille, että suurin osa todellisista, vapaista pinnoista ei ole täydellisen puhtaita, ja että pintojen karkeushuippujen mekaaninen lukittuminen toisiinsa voi peittää allensa adhesiiviset toiminnot. Pinnat sisältävät epäpuhtauksia, imeytyneitä hiilivetyjä ja kosteutta sekä epäjalojen metallien tapauksessa oksideja ja haalistumia. Luonnolliset epäpuhtaudet eivät välttämättä näy paljaalla silmällä, mutta silti niillä saattaa olla voiteluominaisuuksia pinnalle. Näin ollen kitkavastus saattaa ainakin osittain johtua pintakalvojen mekaanisista ja kemiallisista ominaisuuksista. (Blau 2009, s.124.)

3.4 Kitka

Kitka on ilmiö, joka vastustaa kappaleen liukumista tai pyörimistä toisen kappaleen suhteen sen tangentialisessa suunnassa, kun kappaleet ovat toistensa kanssa kontaktissa. Vastustavaa tangentialista voimaa, joka vaikuttaa vastakkaiseen suuntaan kappaleen liikkeen kanssa, kutsutaan kitkavoimaksi. Kitka voidaan jaotella kahteen eri päätyyppiin: kuivakitkaan ja nestekitkaan. Tässä diplomityössä näistä kahdesta perehdytään vain kuivakitkaan. Kuten nimi kertoo, kuivakitka kuvaa kontaktivoimasta aiheutuvaa tangentialista voimakomponenttia, joka syntyy, kun kaksi kuivaa pintaa liikkuvat tai yrittävät liikkua toistensa suhteen. (Bhushan & Petralia 2013, s.321.) Kontaktitilanteissa, joissa on käytetty kappaleiden välistä voitelua, kitkavoima voidaan laskea useimmissa tapauksissa useiden matemaattisten lausekkeiden avulla. Kuiville kontakteille kitkavoima määritetään yleensä kuitenkin kokeellisesti. Seuraavat neljä kokemuseräistä sääntöä kitkasta on tunnettu jo vuosisatojen ajan:

- ennen liukumista aiheutuvan suurimman tangentialisen voiman ja normaalivoiman välillä on verrannollisuus, kun paikallaan oleva kappale on kasvavan tangentialisen voiman alaisuudessa
- tangentialinen kitkavoima on verrannollinen normaalivoimaan liukumisen aikana
- kitkavoima on riippumaton näennäisestä kontaktipinta-alasta ja
- kitkavoima on riippumaton liukumisnopeudesta.

Nämä säännöt esiintyvät kohtuullisesti kuormitetuilla kontakteilla ja kohtuullisilla liukumisnopeuksilla. (Stachowiak & Batchelor 2014, s.502.)

Jos kaksi kiinteää kappaletta kuormitetaan yhteen ja tangentialinen voima F_f kohdistetaan toiseen kappaleeseen, tangentialisen voiman suuruus, joka vaaditaan liikkeen aloitukseen, kutsutaan lepokitkavoimaksi, $F_{f,s}$. Tangentialista voimaa, joka ylläpitää suhteellista liikettä,

kutsutaan liukukitkavoimaksi, F_{fk} . Suhteellisen liikkeen alullepano saattaa kestää rajapinnassa muutamia millisekunteja. Lepokitkavoima on joko suurempi tai yhtäsuuri kuin liukukitkavoima. (Bhushan & Petralia 2013, s.321.)

3.4.1 Kitkavoiman ja normaalivoiman välinen yhteys

Amontonsin (1699) lain mukaan kappaleeseen vaikuttava kitkavoima on verrannollinen kappaleen normaalivoimaan eli

$$F_f = \mu F_n \quad (16)$$

missä μ on kitkakerroin [-]
 F_n on kappaleeseen vaikuttava normaalivoima [N]

Kitkakerroin μ on vakio, joka osoittaa kitkavoiman suuruuden (Stachowiak & Batchelor 2014, s.503). Amontonsin kitkalain mukaan kitkavoima on myös verrannollinen normaalivoiman lisäksi todelliseen kontaktipinta-alaan. Varhaisissa pintojen kontaktien tutkimuksissa oletettiin, että karheushuippujen pitää muuttua muotoaan plastisesti, koska kosketusjännitykset huippujen välillä ovat todella suuret. Myöhemmin on kuitenkin osoitettu, että kontaktissa olevien pintojen karheushuiput saavuttavat tietynlaisen olomuodon, missä muodonmuutos on elastista ensimmäisen plastisen muodonmuutoksen jälkeen. Tutkimuksissa on löydetty, että korkean epätasaisuuden omaavalla mallipinnalla kuormituksen ja kontaktipinta-alan välinen suhde on lähes lineaarinen siitä huolimatta, että kontakti on elastista. Normaalivoiman aiheuttama epälineaarinen kontaktipinta-alan kasvu yksittäisessä karheushuippukontaktissa kompensoituu kontaktien lukumäärän kasvulla, kuten luvussa 3.2 ”Kiinteiden pintojen välinen kontakti” on selostettu. Sama ilmiö on myös löydetty todellisilla pinnoilla, joissa pintojen topografia on satunnaista. Amontonsin kitkalaki on siis myös paikkansapitävä elastisissa muodonmuutoksissa. Tämä todistaa sen, että pintojen rakenne on monimutkainen ja hierarkkinen rakenne, jotta useamman kokoluokan mikrokontaktien on mahdollista tapahtua. (Stachowiak & Batchelor 2014, s.504).

Tangentiaalinen kitkavoima kontaktipinnassa vaikuttaa pinnan jännitysjakautumisiin sekä kontaktipinta-alan kokoon ja muotoon. Jos kahdella toistensa päällä liukuvalla homogeenisellä kiinteällä kappaleella on samat elastiset vakiot, missä tahansa rajapinnan pisteessä vastakaiset ja saman suuntaiset normaalisiirtymät kasvavat, kun pintojen välillä siirtyy tangentiaalinen voima. Tästä syystä yhden pinnan kiertyminen mukautuu tarkoin toisen suhteen eikä muuta puristusjännityksen jakaumaa. Kontaktialan muoto ja koko ovat sidottuja kahden pinnan karheusprofiileihin ja normaalivoimaan, ja ovat siten riippumattomia tangentiaalisesta voimasta. Jos kiinteiden kappaleiden elastiset ominaisuudet ovat erilaiset, tämä teoria ei enää päde ja tangentiaalinen voima vaikuttaa puristusjännitykseen. (Bhushan & Petralia 2013, s.200.)

Johnson (2003, s.204) on osoittanut, että tangentiaalisen voiman vaikutus puristusjännitykseen ja kontaktipinta-alaan on yleensä pieni. Tämä pätee erityisesti silloin kun kitkakerroin on alle yhden. Voidaan siis olettaa, että jännitykset ja muodonmuutokset normaali- ja tangentiaalivoimista ovat toisistaan riippumattomia, ja ne voidaan yhdistää toisiinsa jännitysresultantin löytämiseksi.

Verrannollisuus kitkavoiman ja normaalivoiman välillä on johtanut liuku- ja lepokitkaker-toimien määrittämiseen. Kitkakertoimet määritellään usein kirjallisuudessa joidenkin mate-riaalien kombinaatioiden ominaisuuksina. Tämä lähestymistapa on kuitenkin todella yksin-kertaistettu, koska kitkakertoimet ovat riippuvaisia muuttujista kuten lämpötila. Joissain ta-pauksissa kitkavoiman ja normaalivoiman välillä ei ole selvää verrannollisuutta kitkakertoi-miin. Tämänhetkisen tiedon mukaan monet kitkan ominaisuuksista ovat tulosta karheiden pintojen ominaisuuksista, kun ne ovat kontaktissa toistensa kanssa. (Stachowiak & Batchelor 2014, s.504). Kitka ei ole materiaaliominaisuus, se on systeemireaktio. Jos kaksi kiinteää pintaa ovat täysin puhtaita ilman, että niissä on kemikaalikalvoa tai adsorbaattia, kitkan voi-makkuus on korkea. Pinnan epäpuhtaudet tai ohuet kalvokerrokset vaikuttavat kitkan suu-ruuden laskuun. (Bhushan & Petralia 2013, s.321.)

Kolme ensimmäistä kitkasääntöä, jotka esitettiin luvun 3.4 alussa, pitävät pääsääntöisesti paikkansa muutaman prosentin hajonnalla useimmissa tapauksista. On kuitenkin korostet-tava, että kitkakerroin μ on vakio vain tietyillä materiaalipareilla tietyjen olosuhteiden, ku-ten lämpötila, kosteus, puristusjännitys ja liukunopeus, alaisuudessa. Monien materiaalien lepo- ja kitkakertoimet ovat riippuvaisia normaalivoimasta, liukunopeudesta ja näennäisestä kontaktipinta-alasta. Tämän lisäksi kitkakerroin μ on mittakaavariippuvainen. Siitä syystä mitä tahansa ilmoitettua kitkakertoimen arvoa tulisi käyttää varoen. (Bhushan & Petralia 2013, s.328.)

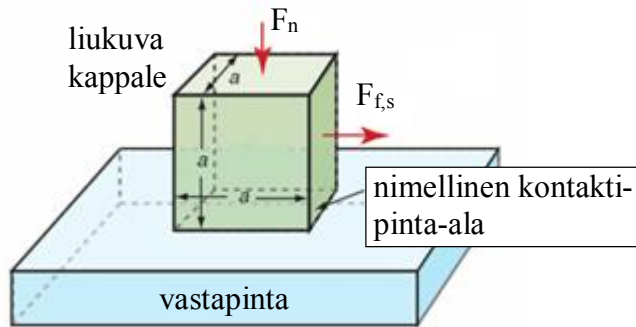
Kaiken edellä mainitun perustella voidaan todeta, että kitkakertoimet olisi aina määritettävä kokeellisesti ensin käytettävillä materiaaleilla oikeassa mittakaavassa ja käyttöympäristössä, sillä valmiiden taulukkoarvojen käyttö on epävarmaa ja liian yleisellä pohjalla. Suotuisaa on kuitenkin se, että luvun 3.4 alun kitkalakeihin on luottaminen yleisellä tasolla, joten periaat-teessa vain kitkakerroin on määritettävä kokeellisesti, jos todellisen kitkavoiman haluaa sel-vittää.

3.4.2 Liukukitkakerroin ja -voima

Kahden pinnan ollessa kosketuksissa normaalivoiman F_n alaisuudessa, ja toinen pinta laite-taan liukumaan toisen pinnan päällä, voima F_s vastustaa liikettä. Voima F_s on yleensä ver-rannollinen normaalivoimaan F_n , mutta ei näennäiseen pinnan alaan. Liukukitkakerroin μ_k määritetään Kuva 23:n mukaan seuraavasti (Ashby et al. 2007, s.228)

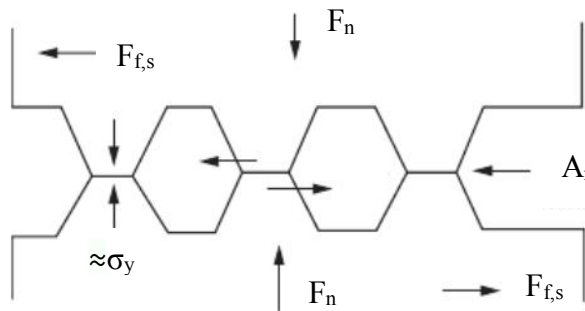
$$\mu_k = \frac{F_{f,k}}{F_n} \quad (17)$$

missä $F_{f,k}$ on liukumista vastustava liukukitkavoima [N]
 F_n on liukuvaan kappaleeseen vaikuttava normaalivoima [N]



Kuva 23. Periaate kitkakertoimen määrittämisestä (Ashby et al. 2007, s.229).

Jos toista pintaa yrittää liikuttaa toisen pinnan päällä, karheushuippujen pinnassa syntyy leikkausjännitystä $F_{f,s}/A_r$ (Kuva 24). Leikkausjännitys on suurinta joko pienimmässä karheushuippujen poikkipinta-alassa tai erittäin lähellä kontaktitasoa. Liittymäkohdat voivat kestää leikkausjännitystä materiaalin leikkauslujuuden verran. (Ashby et al. 2012, s.419)



Kuva 24. Pintojen välinen aito kontaktipinta-ala (Ashby et al. 2012, s.419).

Liukukitkakertoimen määrittämiseen laskennallisesti materiaaliominaisuuksien avulla on ehdotettu monta erilaista mallia, mutta suurinta osaa näistä malleista ei hyväksytä kitkatutkimuksen alalla. Yleensä hyväksytyin liukukitkakertoimen laskentamalli tieteessä on Bowdenin ja Taborin malli, joka on esitetty alla.

$$\mu_k = \frac{f_{v,k}}{H} \quad (18)$$

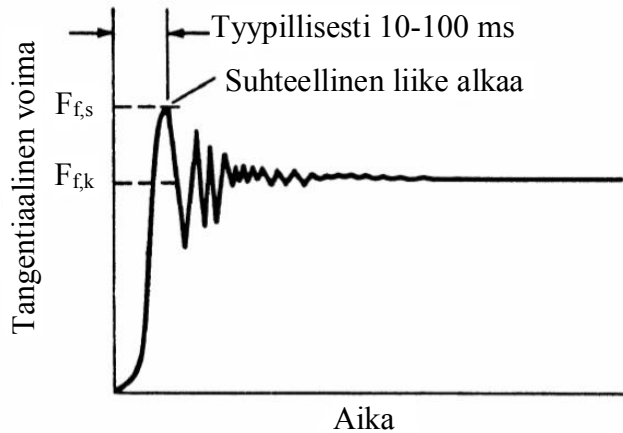
missä $f_{v,k}$ on pinnan huippujen liittymäkohdan leikkauslujuus [N/mm²]
 H on kontaktiparin pehmeämmän materiaalin kovuus [N/mm²]

Tämän mallin ja lausekkeen ongelmana kuitenkin on oletus, että pinnan huippujen lujuus tunnetaan. Tällaista tietoa pinnoista ei ole saatavilla, ja sitä ei ole helppo selvittää kokeellisesti. Usein yhtälössä (18) käytetään materiaalin yleistä leikkauslujuutta. Liukumaolosuhteet voivat kuitenkin vaikuttaa pinnan huippujen lujuuteen. Lisäksi muodonmuutosnopeus vaikuttaa mekaanisiin ominaisuuksiin, ja tämän takia pinnan huiput voivat käyttäytyä eri tavalla eri liukumisnopeuksilla yhdessä eri muodonmuutosnopeuksilla. (Blau 1992, s.59-60.)

3.4.3 Lepokitkakerroin ja -voima

Edellisessä luvussa selostettu kitka kuvaa kappaleen liukukitkaa. Jos kappaleiden pinnat jätetään staattiseen kontaktiin, pintojen liittymäkohdat kasvavat viruman ansiosta. Tästä johtuen liittymäkohdat muovautuvat vahvemmiksi, mikä tarkoittaa, että kappaleen liikkeelle

laittamiseen tarvitaan suurempi tai yhtä suuri voima kuin liikkeen ylläpitämiseen. Liikkeen alkamista vastustava kerroin, eli lepokitkakerroin μ_s , on siis suurempi kuin liikettä vastustava liukukitkakerroin (Ashby et al. 2007, s.233-234). Kuva 25:ssa on esitetty tangentialiisen voiman ajan tai siirtymän funktiona. Kuvasta voidaan nähdä, miten lepokitkavoima $F_{f,s}$ on suurempi kuin liukukitkavoima $F_{f,k}$.

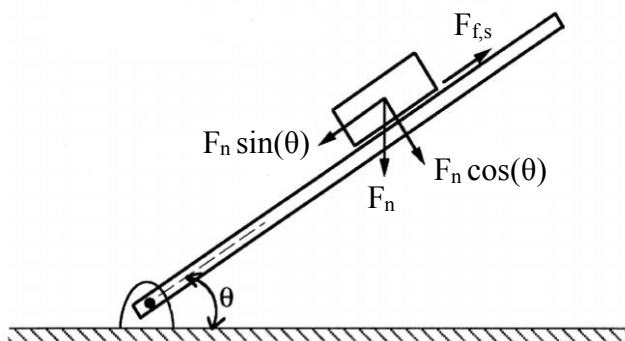


Kuva 25. Tangentialiinen voima ajan tai siirtymän funktiona (Bhushan & Petralia 2013, s.322).

Vaihtoehtoisesti kaavan (17) lepokitkakertoimen voi esittää muuttumattoman lepokulman tai kitkakulman θ avulla seuraavasti

$$\mu_s = \tan(\theta) \quad (19)$$

Kitkakulma θ määritetään niin, että mikä tahansa kappale millä tahansa massalla on sijoitettu tason päälle, joka on kallistettu kulmaan, ja joka on pienempi kuin θ vaakatasossa. Jos kulma on pienempi kuin θ , pysyy kappale paikoillaan, mutta jos kulma nousee θ yläpuolelle, kappale alkaa liukua alaspäin.



Kuva 26. Kappaleen vapaakappalekuvio kallistetussa tasossa (Bhushan & Petralia 2013, s.324).

Lepokitkakerroin voidaan määrittää Kuva 26:n mukaan lepokitkavoiman ja tasoa vastaan kohtisuoran normaalivoiman tangentin avulla kaavalla

$$\mu_s = \frac{F_{f,s}}{F_n \cdot \cos(\theta)} \quad (20)$$

missä $F_{f,s}$ on liukumisen alkamista vastustava lepokitkavoima [N]
 F_n on kappaleen massasta aiheutuva normaalivoima [N]

3.4.4 Stick-slip-ilmiö

Monen voitelemattoman systeemin tapauksessa lepokitkakerroin on suurempi kuin liukukitkakerroin. Tämä on yksi syy, miksi kappaleen liikkeessä saattaa tapahtua kitkavärähtelyä. Tätä seurannaisliikettä, joka syntyy kitkavärähtelystä, kutsutaan stick-slip-ilmiöksi. Stick-slip voidaan määritellä vaimentavana värähtelynä, joka on yhteydessä kitkakertoimen laskuun suhteellisen nopeuden samalla noustessa. Stick-slip on nykivä liike, joka tapahtuu, kun kappale liikkuu toisen kappaleen päällä. Jos kappaletta vedetään, kappale jumittuu, sitten liikkuu nopeasti, jumittuu uudelleen ja niin edelleen. Äkillinen eteenpäin liikkuminen tapahtuu, kun kaksi pintaa on toisissaan kiinni siihen asti, kunnes systeemin elastinen energia on kasvanut tiettyyn pisteeseen. (Blau 1992.)

Liukusysteemeissä stick-slip-ilmiö tulee esiin selvästi nykivänä liikkeenä, joka voidaan nähdä kitkavoiman käyttäytymisestä ajan suhteen. Kitkavoimapiikki, joka viittaisi lepokitkakertoimeen, saattaa tai ei saata olla olemassa liukusysteemeissä. Kitkavoiman edellä kuvattua käyttäytymistä voi tarkastella Kuva 25:ssä, missä kitkavoima nousee ja laskee kitkan taajuuden pienentyessä ennen sen tasoittumista. Se, mikä aiheuttaa stick-slip-ilmiön, on yhdistelmä kontaktissa olevien materiaalien olemuksesta, pintojen muodosta, pintojen kemiallisesta olemuksesta, yhdenmukaisuudesta ja kontaktijännityksestä. (Blau 1992.)

4 Kitka puupinnoilla

4.1 Suuruusluokkaan vaikuttavat tekijät

Kuten luvussa 3.4.1 kerrottiin kitkakertoimeen ja sen suuruuteen vaikuttavat tietyt olosuhteet, kuten esimerkiksi lämpötila ja kosteus. Tässä luvussa käsitellään olosuhteita ja tekijöitä, jotka vaikuttavat kitkan suuruuteen puupintojen ollessa kontaktissa.

Puun lepo- ja liukukitkakertoimiin vaikuttaa puun kosteuspitoisuus, puun pinnan karkeus ja vastakkaisen pinnan ominaisuudet. Kertoimet vaihtelevat vain vähän puulajien välillä paitsi puilla, jotka sisältävät runsaasti öljyisiä tai vahaisia aineita, kuten esimerkiksi guajakkipuu. (Forest Products Laboratory - USDA 2010.) Näiden ohella kitkan arvoissa aiheuttaa vaihtelua puun vinosyisyys, lämpötila ja kuormitusnopeus (McKenzie & Karpovich 1968). Lisäksi liukusuunnan suhde puun syihin nähdessä vaikuttaa kitkan suuruuteen (Blau 2009, s.183). McKenzie ja Karpovich (1968) tutkivat puun kitkakertoimen suhdetta puulajien, kontaktipintojen karkeuden ja kuormitusnopeuden välillä. Tutkimus osoitti, että kitkakerroin vaihteli 0,1 ja 0,65 välillä puulajien ja kontaktipintojen karkeuden mukaan. Puulajeilla, jotka olivat öljyisiä, oli huomattavasti matalammat kitkakertoimet. McKenzie ja Karpovich huomasivat myös, että kuormitusnopeuden noustessa kitkakerroin laski. Edellä mainittujen tekijöiden suhteellinen merkitsevyys ja roolit kitkassa ovat tosin vielä epävarmoja, sillä vain harvassa tutkimuksessa näitä tekijöitä on voitu arvioida empiirisesti (Park et al. 2011).

4.1.1 Kosteuspitoisuus

Puun kitkakertoimet nousevat useampien materiaalien kanssa sitä mukaan, kun puun kosteuspitoisuus nousee uunikuivatusta puusta puun syiden kyllästymispisteeseen (Forest Products Laboratory - USDA 2010). Kyllästymispisteellä tarkoitetaan sitä puun tilaa, jossa puun soluonteloiden vapaa vesi on poistunut, mutta soluseinämät sisältävät enimmäismäärän vettä. Puun kosteuspitoisuus on tällöin noin 30 %. (Puuinfo 2011.) Tämän pisteen jälkeen kitkakertoimet pysyvät vakiona kosteuspitoisuuden noustessa siihen asti kunnes vapaata vettä on huomattavasti esillä puun pinnalla. Kun pinta on veden vallassa, kitkakertoimien arvot laskevat. (Forest Products Laboratory - USDA 2010.)

Puun lepokitkakertoimet ovat yleisesti suurempia kuin liukukitkakertoimet. Liukukitkakertoimien suuruuteen vaikuttaa jonkin verran kappaleiden liukunopeus. Kun puun kosteuspitoisuus on pienempi kuin 20 %, liukukitkakertoimet vaihtelevat vain hieman liukunopeudesta. Kun puun kosteuspitoisuus on suuri, liukukitkakerroin laskee olennaisesti nopeuden kasvaessa. Liukukitkakerroin sileälle, kuivalle puulle kovaa, sileää pintaa vasten vaihtelee 0,3...0,5 välillä, keskisuurilla kosteuspitoisuuksilla 0,5...0,7 välillä ja lähellä puun syiden kyllästymispistettä 0,7...0,9 välillä. (Forest Products Laboratory - USDA 2010.) Kitkakertoimien arvoja on esitetty tarkemmin luvussa 4.2 ”Kitkakertoimien arvot kirjallisuudessa”.

Murase (1984) on tutkinut puukappaleen liukumista puun päällä, ja saanut samankaltaisia tuloksia kuin yllä on esitetty. Tutkimuksessa liukuva puukappale oli mäntykasvien heimoon kuuluva lännenhemlocki. Liukukappaleen alemmat vastakappaleet olivat lännenhemlockia ja isu-puuta, joka on ainavihanta pensaspuu. Liukumissuunta liukukappaleilla oli samansuuntainen kappaleiden syiden suunnan kanssa. Alempi näyte oli aina ilmakuivaa puuta, mutta se vakioitiin vedenkylästäjän näytteen kosteuspitoisuudelle, jos ylempi näyte oli vedenkylästäjää puuta.

Murasen (1984) tutkimuksessa todettiin, että puukappaleiden välinen kitkakerroin on riippumaton normaalivoimasta, vaikka kitkakertoimien arvoissa havaittiin jonkin asteista hajontaa. Tutkimuksessa todettiin, että koekappaleiden vedossa tapahtuu stick-slip-ilmiö, kun koekappaleen kosteuspitoisuus on alle puukuidun kyllästyspisteen. Huomattiin, että puun kitkakertoimen arvo kasvaa, kun puun kosteuspitoisuus kasvaa uunikuivasta kyllästyspisteeseen. Kun puinen koekappale on vedenkylästäjän tilassa, stick-slip-ilmiötä ei esiinny, vaikka kitkakerroin vedenkylästämissä koekappaleissa oli lähes yhtä suuri kuin puukuidun kyllästyspiste. Kitkan suuruuden vaihtelun kosteuspitoisuuden takia voidaan selittää tämän tutkimuksen koeolosuhteissa adheesion vuoksi. (Murase 1984.)

Murasen tutkimuksen pohjalta voidaan todeta, että jos kitka haluttaisiin maksimoida, tulisi puun kosteuspitoisuuden olla lähellä puukuidun kyllästyspistettä eli noin 30 % puun kosteuspitoisuutta. Puun kosteuspitoisuuteen vaikuttaa kuitenkin ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila eikä se näin ollen ole absoluuttinen arvo. Puun kosteuspitoisuudesta voidaan käyttää termiä tasapainokosteus, sillä puun kosteuspitoisuus asettuu aina tasapainoon ympäröivän ilman kosteuden kanssa tietyssä lämpötilassa. Puun tasapainokosteuden tulisi olla runkorakenteissa enintään 24 %. (Puuinfo 2011.)

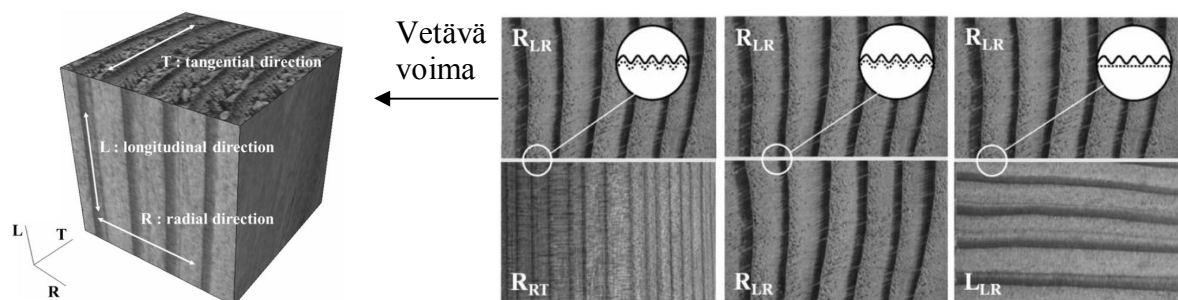
4.1.2 Puun syiden suunnan merkitys

Jokaisella puun päätasolla on puun ortotrooppisuuden vuoksi eriasteinen karkeusaste, joten kitkakertoimet riippuvat pinnoista, jotka ovat kontaktissa. Kahden puupalan välistä kitkaa voidaan tutkia pituussuuntaa vastaan kohtisuorissa pinnoissa, jotka on leikattu syitä vastaan

kohtisuoraan ja kahdessa katkaisupinnassa syiden suuntaan eli säteen ja tangentin suuntaisesti. Liukumista voidaan tutkia jokaisessa tasossa kahdessa kohtisuorassa suunnassa: säteen ja tangentin suuntaisesti pituussuuntaa vastaan kohtisuorissa pinnoissa sekä syiden suuntaan ja syitä vastaan kohtisuoraan pituussuuntaisissa pinnoissa. On myös mahdollista yhdistää kaksi eri leikkauspintaa, joten yhdistelmämahdollisuudet moninkertaistuvat. Tästä syystä kitkan tutkimusta tulee täsmentää jokaisessa tapauksessa. Lisäksi syiden suuntaisten pintojen leikkaukset, eli säteen ja tangentin suuntaiset, nostavat vähän karkeuden taipumusta leikkaustasossa. (Aira et al. 2014.)

Park et al. (2011) tutkivat kahden puukappaleen välisen lepo- ja liukukitkaa erisuuruisten normaalivoimien alaisuudessa sekä syiden suunnan merkitystä kitkaan todellisessa kontaktipinta-alassa. Molemmat koekappaleet olivat lajiltaan japaninlehtikuusta (*Larix kaempferi*). Alempi koekappale oli paikoillaan, ja toista koekappaletta vedettiin sen päällä samalla, kun erisuuruisia normaalivoimia kohdistettiin ylempään koekappaleeseen. Normaalivoimien suuruus oli noin $0,01 \dots 0,04 \text{ N/mm}^2$ välillä. Tutkittavat kitkapinnat jaettiin kolmeen eri osaan puun syiden suuntaan vaikuttavan vetävän kuormituksen perusteella niin, että tutkittava pinta oli:

- syiden pituussuuntainen, ja kuormitus syiden suuntainen (L_{LR})
- syiden pituussuuntainen, ja kuormitus syitä vastaan kohtisuora (R_{LR})
- kohtisuora syihin nähden, ja kuormitus syitä vastaan kohtisuora (R_{RT}).



Kuva 27. Vasemmalla on esitetty koekappaleen pinnat ja vetävän kuormituksen suunnat syihin nähden (R: säteen suuntainen, L: pituussuuntainen ja T: tangentin suuntainen). Oikealla on kolme eri variaatiota syiden ja kuormituksen suunnasta koekappaleiden sivusta kuvattuna. Iso kirjain kertoo kuorman suunnan ja alaindeksi kontaktissa olevan pinnan. (Park et al. 2011.)

Tutkimuksen mukaan lepokitkakertoimet, syiden suunnasta riippumatta, laskivat hieman sitä mukaan, kun normaalikuormaa lisättiin. Tämän tutkimuksen tulosten perusteella voidaan kuitenkin todeta, että lepokitka pysyy samana huolimatta normaalivoiman suuruudesta ja kappaleiden syiden suunnasta toisiinsa nähden. Liukukitka oli niin ikään vakio eri suuruksilla kuormituksilla. Tutkimuksessa kuitenkin myönnetään, että kokeessa käytetyt normaalivoimat ovat suhteellisen pieniä todellisiin, rakentamisessa käytettyihin kuormiin. Lepokitkan käyttäytymistä pitäisi tutkia suurien normaalivoimien kanssa. (Park et al. 2011.)

Park et al. (2011) havaitsivat, että koekappaleiden syiden suunta vaikutti hieman kitkakertoimiin, kun pituussuuntainen LR-pinta (L_{LR}) oli kontaktissa samanlaisen pinnan tai säteen suuntaisen LR-pinnan (R_{LR}) kanssa. Tällöin lepo- ja liukukitkakertoimet olivat noin 0,5 ja noin 0,3 edellä mainitussa järjestyksessä. Kuitenkin, kun säteen suuntainen LR-pinta (R_{LR}) oli kontaktissa samanlaisen tai säteen suuntaisen RT-pinnan (R_{RT}) kanssa, kitkakertoimien

arvoilla oli tapana nousta huomattavasti. Tutkimuksen kaikkein suurin lepo- ja liukukitkakerroin esiintyi säteen suuntaisen LR-pinnan (R_{LR}) kohdatessa säteen suuntaisen RT-pinnan (R_{RT}), jonka tapauksessa lepokitkakerroin oli noin 0,7 ja liukukitkakerroin oli hieman alle 0,6. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan sanoa, että jos puuta kuormitetaan kohtisuoraan puun syitä vastaan, kitkavoima on suuri todellisen kontaktipinta-alan takia. Kuva 27:n koepareista R_{LR} - R_{RT} ja R_{LR} - R_{RL} voidaan nähdä, että pinnat ovat karkeampia kuin syiden suuntainen tasaisempi L_{LR} . Korkea karkeus esiintyy todennäköisemmin pituussuuntaa vastaan kohtisuorissa leikkauksissa. Koska molempien kappaleiden karkeus on suuri, on kontaktipinta-alakin suurempi. Puussa pinnan karkeus muodostuu hauraamman kevätpuun ja lujemman, tiheämmän kesäpuun osuuden mukaan.

Aira et al. (2014) tutkivat sahatun männyn (*Pinus sylvestris* L.) välistä kitkaa, kun kahta koekappaletta vedettiin toistensa päällä. Kitkaa tutkittiin kahdessa tapauksessa: ensiksi syiden pituussuuntaa vastaan kohtisuorassa oleva pinta liukui kohtisuoraan puun syihin nähden tangentin suuntaisesti ja toiseksi säteiden suuntainen pinta liukui syiden suuntaan. Molemmissa tapauksissa molempien koekappaleiden pinnat ja niiden syyt olivat symmetriset toisiinsa nähden.

Aira et al. (2014) havaitsivat, että syitä vastaan kohtisuorilla pinnoilla, jotka liukuivat syitä vastaan kohtisuorasti, lepo- ja liukukitkakertoimilla ilmeni pienemmät arvot kuin puulla yleensä tieteellisessä kirjallisuudessa. Kirjallisuudessa esiintyviä arvoja on esitetty luvussa 4.2. Mäntypuissa ja monissa havupuissa on korkea pihkapitoisuus, joka edistää pintojen välistä liukumista. Pihka toimii puupintojen välisenä voiteluaineena. Toisaalta kirjallisuudessa esitettyjä arvoja ei ole yleensä eritelty havu- ja lehtipuiden välillä, tarkkojen kontaktipintojen eikä syiden liukumissuunnan mukaan. Tutkimuksessa saatu lepokitkakerroin on 0,24 ja liukukitkakerroin 0,17. Arvot ovat samoissa rajoissa, mitkä syitä vastaan kohtisuoralle liukuvälle havupuulle yleensä esitetään.

Aira et al. (2014) tutkimuksessa havaittiin suurempi hajonta saatujen lepo- ja liukukitkakertoimien arvoissa, kun säteen suuntaisten pintojen liukusuunta oli syiden suuntainen. Tutkimuksessa havaittujen tulosten hajonta saattaa johtua puisten koekappaleiden pintojen sahauksesta. Pinnat ovat puun pituussuuntaisen sahauksen takia pinnan karkeuden näkökulmasta vähemmän homogeeniset kuin syitä vastaan kohtisuorat pinnat, koska puukuidut on sahattu pituussuuntaisesti säteen suuntaisissa pinnoissa. Säteen suuntaisten pintojen liukussa puun syiden suuntaan, lepo- ja liukukitkakertoimien arvot olivat 0,12 ja 0,08 edellä mainitussa järjestyksessä.

Xu et al. (2014) tekivät samankaltaisia havaintoja kuin kahdessa edellisessä tutkimuksessa. Kuten edellä esitetyissä tutkimuksissa, toista puukoe kappaletta vedettiin toisen puukoe kappaleen päällä. Tutkittavia puulajipareja oli kolme: haapa-haapa, mantšuriansaarni-mantšuriansaarni ja mäntypuihin kuuluva koreansembra-koreansembra. Xu et al. tutkivat jokaisella puulajiparilla syiden suunnan vaikutusta kitkaan kolmessa tapauksessa: molempien kappaleiden syyt olivat yhdensuuntaiset liukusuunnan kanssa, molempien kappaleiden syyt olivat kohtisuoraan liukusuunnan kanssa sekä vedettävän kappaleen syyt olivat kohtisuoraan ja alemman kappaleen syyt olivat yhdensuuntaiset liukusuunnan kanssa. Tutkimuksen tulokset osoittavat, että kitkakertoimet olivat puulajista huolimatta suurimmat, kun molempien koekappaleiden syyt olivat kohtisuorassa vetävää kuormaa vastaan. Kitkakertoimet olivat pienimmät, kun alemman kappaleen syyt olivat vetävään kuormaan nähden vetovoiman suuntaisesti ja ylemmän, vedettävän kappaleen syyt olivat vetovoimaa vastaan kohtisuoraan.

Koekappaleissa ilmeni enemmän stick-ilmiötä, kun kahden puukappaleen syiden suunta oli kohtisuoraan liukusuuntaan nähden.

Edellä mainituissa tutkimuksissa yhteistä on se, että suurin lepo- ja liukukitka ilmenee, kun puuta kuormitetaan syitä vastaan kohtisuoraan. Pienimmät kitkavoimat ilmenivät taas, kun joko liukuvan, paikallaan olevan kappaleen tai molempien kappeleiden syyt olivat samansuuntaiset liukusuunnan kanssa. Vaikka tutkimusten kitkakertoimien arvot vaihtelivat puulajien välillä, tutkimuksissa tehtiin silti samoja havaintoja kitkakertoimien suurusluokissa syiden ja liukusuunnan välillä eri puulajeista huolimatta. Huomioitavaa on myös se, että puun pintojen kitkaominaisuuksiin vaikuttaa enemmän se, että pinta on leikattu syiden suuntaisesti kuin että puu olisi leikattu syitä vastaan kohtisuorasti.

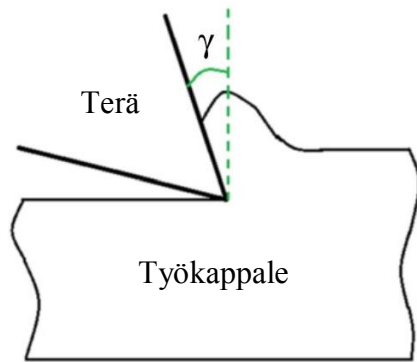
4.1.3 Pintojen laatu ja karkeus

Puun pintojen ominaisuudet voidaan jakaa kahteen pääryhmään: fysikaalisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin. Fysikaalisiin ominaisuuksiin kuuluvat morfologia eli pinnan rakenne, pinnan karkeus, pinnan tasaisuus, ominaispinta-ala ja läpäisykyky. Kemiallisiin ominaisuuksiin kuuluvat alkuaine- ja molekyylikoostumus. (Rowell 2005, s.187.)

Puulla on solurakenne, jonka soluseinämät koostuvat kolmesta pääaineosasta: selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä eli puuaineesta. Lisäksi näihin pääainesosiin, soluseinämät sisältävät myös pektiiniä, uuteainetta ja hivenaineiden metalleja. Puun pintaominaisuudet ovat siksi määritetty puun pinnassa soluseinämän morfologian sekä pää- ja sivuainesosien jakauman mukaan. (Rowell 2005, s.187.)

Puun ominaisuuksista puun laji, tiheys, kosteuspitoisuus, huokoisuus ja työstöolosuhteet vaikuttavat pinnan karkeuteen (Magoss 2008; Malkoçoğlu 2007; Vitosytė et al. 2015). Puun pintaominaisuuksien luonnehdinta on monimutkaista ja vaikeaa. Millään olemassa olevalla yksittäisellä mittaustekniikalla ei saada täysin riittävää luonnehdintaa puun pintakemiasta. (Rowell 2005, s.209.) Yksi olennainen ongelma on, että puu ei ole täydellisen kiinteä materiaali sen sisältämien soluonteloiden takia. Lisäksi puun ollessa hauras materiaali, on se taipuvainen hauraaseen murtoon. Puun sahauksen seurauksena leikkausmekanismi on aina yhteydessä materiaalin lokaaliin murtoon aiheuttaen epätasaisen pinnan. (Magoss 2008.) Puun sahaussuunta vaikuttaa sen pinnan karkeuteen. Säteen suuntaisesti sahatulla puulla on hie- man pienempi pinnan karkeus kuin tangentin suuntaisesti sahatulla puulla. Tämän lisäksi kevätpuun karkeus on korkeampi kuin kesäpuun. (Vitosytė et al. 2015.)

Puun putkisolujen, vesisolujen ja muiden soluonteloiden halkaisijoiden leikkaaminen työstövaiheessa määrittelee olennaisesti pinnan epäsäännöllisyyden syvyyden. Tietty putkilosolujen määrä asiaankuuluvalla yksikköpituudella leikkaussuunnassa on myös tärkeä tekijä. Putkilo- ja vesisolujen halkaisijat näyttävät aina määrätyn jakauman. (Magoss 2008.) Malkoçoğlu (2007) havaitsi, että viiden turkkilaisen Mustanmeren alueen puulajin höyläyksessä puupintojen karkeus oli paljon sileämpi höylän terän pienemmillä rintakulmilla (Kuva 28).

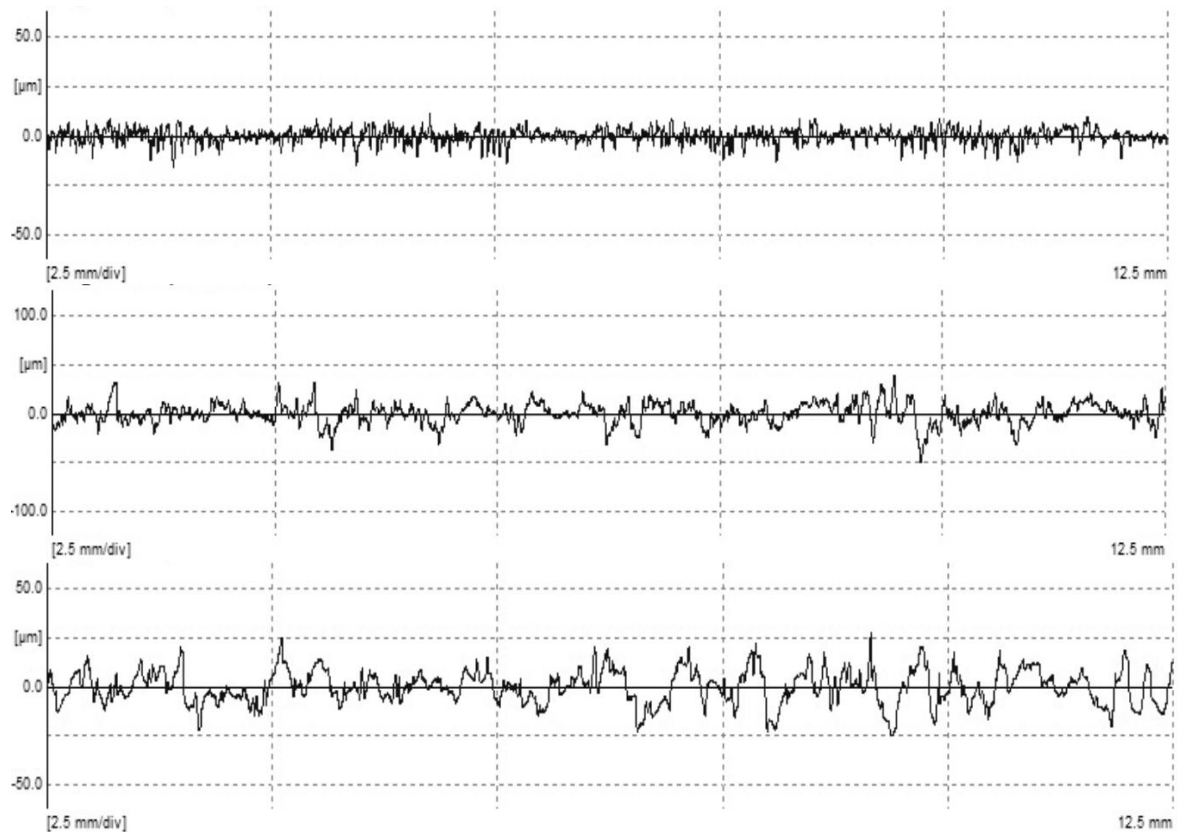


Kuva 28. Höylän terän rintakulma γ (Lai et al. 2013).

Leikkausnopeuksien nostaminen antaa paremman pinnan laadun käytettäessä yleisiä karkeusparametreja, kuten karkeuskeskiarvoa R_a . Puun lajista riippumatta puun pinnan karkeus laskee leikkausnopeuden kasvaessa. Tylppien leikkuuterien käyttö sen sijaan nostaa olennaisesti pinnan karkeutta. Havupuulajit ovat enemmän herkkiä leikkausnopeuden muutoksille pinnan karkeuden suhteen kuin lehtipuulajit. (Magoss 2008.)

Xu et al. (2014) tutkivat samassa luvussa 4.1.2 ”Puun syiden suunnan merkitys” esitetystä tutkimuksessa syiden suunnan merkityksen lisäksi pinnan karkeuden merkitystä kitkakertoimien arvoihin. Puulajien pintojen karkeuskeskiarvot R_a asettuivat välille 3,9...18,4 μm . Tutkimuksessa puun kitkakertoimien ja pinnan karkeuden välillä löydettiin suuri korrelaatio puu-puukitkapareilla. Tutkimuksessa havaitut tulokset osoittavat, että kitkakertoimet nousevat lineaarisesti puun pinnan karkeuskeskiarvon R_a noustessa. Puu on viskoelastinen materiaali, ja kontakti puun välillä ei ole täysin elastista. Todellinen kontaktipinta-ala on aina pienempi kuin näkyvä kontaktipinta-ala pinnan karkeuden vuoksi. Todellinen kontaktipinta-ala ja jumittuva puukomponenttien kitka olivat matalampia karkeammilla pinnoilla. Saman kuormituksen alaisuudessa karkeushuippuihin kohdistuva pistevoima on korkeampi korkeimmilla karkeusasteilla. Tutkimuksen tulokset viittaavat myös siihen, että puun kovuudella olisi merkitystä kitkakertoimiin. Puun kitkavoima on pääosin sisäisen muodonmuutoksen aiheuttamaa epätasaisuuksien ylittämistä kitkapinnoilla. Kokeen havupuukoekappaleet muuttivat muotoaan rajummin kuin lehtipuukoekappaleet.

Vitosytė et al. (2015) totesivat eri asteisilla hiomakarkeuksilla käsiteltyjen puupintojen karkeuksia tutkiessa, että pienin pinnan karkeus todettiin, kun karkeutta mitattiin syiden suuntaan. Suurin pinnan karkeus saatiin, kun mitattiin syitä vastaan kohtisuoraan, ja toiseksi suurin karkeus, kun mitattiin syitä vastaan 45° kulmassa (Kuva 29). Tutkimuksen havaintojen mukaan pinnan karheus oli syitä vastaan kohtisuoraan keskimäärin eri puulajien ja hiomakarkeuksien välillä 1,46 kertaa suurempi verrattuna syiden suuntaiseen pinnan karkeuteen. Tämä tieto selittää luvussa 4.1.3 mainitun toteamuksen, että kitka on suurempaa puun liukuessa syitä vastaan kohtisuoraan kuin syiden suuntaisesti. Kun kontaktipintojen karkeus on suuri, on kitkavoima oletettavasti tällöin myös suurempaa, kuten Xu et al. (2014) totesi tutkimuksessaan.

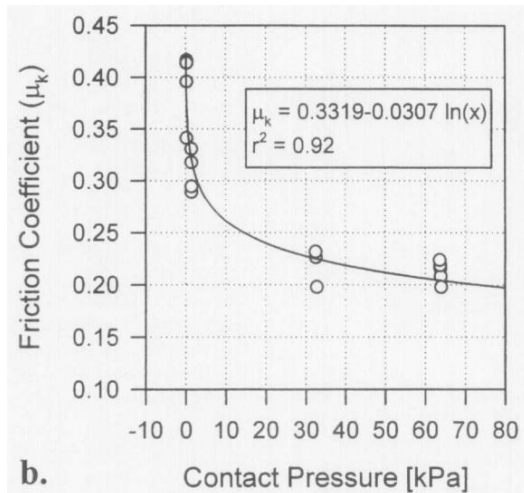


Kuva 29. Koivun pinnan karkeusprofileita mitattuna ylhäältä alaspäin syiden suuntaisesti, syitä vastaa kohtisuoraan ja syitä vastaan 45° kulmassa. Karkeuskeskiarvot R_a ovat samassa järjestyksessä 2,770 µm; 8,165 µm ja 6,898 µm. (Vitosytë et al. 2015.)

4.1.4 Puristusjännityksen suuruus

Bejo et al. (2000) tutkivat, miten puristusjännityksen nostaminen kahden LVL-pinnan välillä vaikuttaa pintojen välisiin kitkakertoimiin. Koekappaleet olivat kontaktissa niin, että päällimmäisen kappaleen syrjä oli alemman kappaleen lappeen päällä. Toisin sanoen, päällimmäisen kappaleen viilut olivat kohtisuoraan alemman kappaleen viiluja vasten. Päällimmäisen kappaleen liukusuunta oli joko alimman kappaleen syiden suuntaisesti tai syitä vastaan kohtisuoraan. Kappaleiden väliset puristusjännitykset olivat 0,5...60 kPa:n välillä. Tutkimuksessa huomattiin, että kontaktissa olevien LVL-pintojen välisen puristuksen suuruudella oli merkittävä vaikutus kitkakertoimiin. Kertoimien arvoissa havaittiin epälineaarinen laskeva trendi, kun kontaktipainetta, eli puristusjännitystä, lisättiin. Kun molempien kappaleiden syyt olivat samansuuntaiset, lepo- ja liukukitkakertoimet laskivat edellä mainitussa järjestyksessä 0,63:sta 0,37:n ja 0,29:stä 0,20:n. Kappaleiden syiden ollessa kohtisuoraan toisiaan vastaan kitkakertoimet laskivat samassa järjestyksessä 0,7:stä 0,40:n ja 0,39:stä 0,21:n.

Bejo et al. (2000) tutkimuksen mukaan kitkakertoimien arvojen suuruuksien erot syiden suunnan perusteella perustuvat pintojen toisiinsa lukittumiseen. Pinnat lukittuvat toisiinsa helpommin kappaleiden syiden ollessa kohtisuoraan toisiaan vasten, koska pintojen epäsäännöllisyydet esiintyvät useammin LVL:n syiden suuntaisesti. Kuva 30:n kuvaajassa on esitetty kitkakertoimien muutos nousevan puristuksen alaisuudessa. Lisäksi Kuva 30:ssa on esitetty tutkimuksessa kehitetty kitkan arviointiyhtälö puristusjännityksen funktiona sekä tämän mallin selitysaste r^2 . Bejo et al. (2000) painottavat, ettei voida tietää, onko em. yhtälöä mahdollista käyttää tutkimuksessa käytetyn puristusjännityksen ulkopuolella.



Kuva 30. Bejo et al. (2000) tutkimuksen kitkakertoimet laskivat, kun pintojen välistä puristusjännitystä lisättiin.

Bejo et al. (2000) tutkimuksen mallin regressioanalyysin perusteella kitkakertoimet saattavat lähestyä minimiarvoa puristusjännityksen noustessa. Syy tähän on mahdollisesti se, että kriittiset muodonmuutokset pinnoissa määrittävät maksimikontaktipaineen, jonka jälkeen kitka muuttuu mekaaniseksi murtumaksi.

Koubek ja Dedicova (2014) tekivät samankaltaisia havaintoja LVL:n ja teräksen välisen kitkan ja muuttuvan puristusjännityksen kanssa kuin Bejo et al. (2000) tutkimuksessaan. Koubek ja Dedicova tutkivat lepokitkakertoimen muutosta kiillotetulla, sileällä teräspinnalla puristusjännitysten ollessa 0,1; 0,3; 10 ja 30 N/mm². LVL:n viilujen syyt olivat samansuuntaiset liukusuunnan kanssa, ja teräksen kanssa kontaktissa oleva pinta oli LVL:n syrjäpinta. Tutkimusten tulosten perusteella lepokitkakertoimien arvot laskivat logaritmisesti puristusjännityksen kasvaessa. Huomattavaa tutkimuksessa oli, että lepokitkakertoimien arvot eivät muuttuneet 10 ja 30 N/mm² puristusten välillä.

Seki et al. (2013) tutkivat havupuisen japaninsypressin (*Chamaecyparis obtusa*) ja teräksen välistä kitkaa suurilla puristusjännityksillä. Tutkimuksen teräslevyjen pinnat olivat kiillotettuja ja hierrettyjä. Koekappaleisiin kohdistuvasta normaalivoimasta aiheutuvat puristusjännitykset olivat noin 1,1; 5,5 ja 11 N/mm². Puristava normaalivoima ja liukumissuunta olivat puun syitä vastaan kohtisuoraan. Tutkimuksen tulosten mukaan kitkakertoimet laskivat puristusjännityksen noustessa kiillotetulla pinnalla. Hierretyllä pinnalla kitkakertoimien arvot pysyivät lähes samana puristusjännityksistä riippumatta. Puu deformatuu huomattavasti syitä vastaan kohtisuoran korkean puristuksen johdosta, koska soluseinämät lommahtavat ja soluontelon tilavuus laskee. Puun muodonmuutoksella voi olla suuri vaikutus rajapinnan kontaktiominaisuuksiin, ja siksi huomattavasti muuttaa kitkakertoimen arvoa. Voidaan todeta, että puun kitkakertoimien arvojen laskemiseen puristusjännityksen noustessa vaikuttavat puun kontaktiominaisuudet rajapinnassa sekä puun muodonmuutosominaisuudet puristuksen ja mittauksen aikana. (Seki et al. 2013.)

Seki et al. (2013) ehdottavat, että kokonaiskitkavoima koostuu adheesio- ja deformaatio-osasta. Liukuvien pintojen välinen kokonaiskitka, joka johtuu rajapinnan adheesiosta, on oleellisesti riippuvainen todellisesta kontaktipinta-alasta A_r . Deformaatio-osaan sisältyy

voima, joka aiheutuu puusta tarttuvan kitkan tai deformaation kautta ylittääkseen metallipinnan epäsäännöllisyydet. Pienillä puristusjännityksillä kitkan deformaatio-osalla ei ole suurta merkitystä kokonaiskitkaan, kun taas adheesio-osalla on suuri merkitys. Suurilla jännityksillä deformaatio-osan osuutta ei voida todennäköisesti jättää huomiotta, koska Seki et al. (2013) tutkimuksessa havaittiin tarttumista korkeilla puristusjännityksillä.

4.2 Kitkakertoimien arvot kirjallisuudessa

Luvussa 3.4.1 todettiin, että kirjallisuudessa käytetyt kitkakertoimien arvot ovat yksinkertaistuksia ja riippuvaisia olosuhteista. Tämän diplomityön ja puupintojen välisen kitkan tutkimuksen kannalta soveliaista tutustua kirjallisuudessa esitettyihin kitkakertoimiin ja niiden suurusluokkiin, jotta saadaan käsitys kitkan suurusluokasta pintojen välillä. Taulukossa 2 on esitetty kirjallisuudessa ja standardeissa määritettyjä lepo- ja liukukitkakertoimia erilaisille puupinnoille.

Taulukko 2. Kirjallisuudessa käytettyjen kitkakertoimien arvoja puupintojen välisille kontakteille.

Kontaktipari	Ehto	Lepokitkakeroin μ_s (-)	Liukukitkakeroin μ_k (-)	Lähde
lehtipuu - lehtipuu	Pintojen välinen paine 0,2...5,0 N/mm ²	-	0,129	(Avallone et al. 2007; Blau 2009)
tammi - tammi	Kontakti syiden suuntaisesti	0,62	0,48	(Avallone et al. 2007; Blau 2009)
tammi - tammi	Kontakti syitä vastaan kohtisuoraan	0,54	0,32	(Avallone et al. 2007; Blau 2009)
puu (puhdas) – puu (puhdas)	-	0,25...0,5	-	(Bhushan & Petralia 2013)
lehtipuu - lehtipuu	-	-	0,15	(Bhushan & Petralia 2013)
tammi - tammi	-	0,5	0,4	(Bhushan & Petralia 2013)
kuusi - kuusi	molemmat pinnat höylätty ja pinnoittamatta, kontakti syiden suuntaisesti, käyttöluokat 1 ja 2	-	0,26	(Kevarinmäki 2002)
LVL - LVL	molemmat kontaktipinnat lappeellaan, pinnat käsittelemättömiä	-	0,4	(Kevarinmäki 2002)
puu (sahattu) – puu (sahattu)	lamellit lappeellaan	-	0,3	(DIN 1052:2004-08)

puu (sahattu) – puu (höylätty)	lamellit lappeel- laan	-	0,2	(DIN 1052:2004- 08)
puu (höylätty) – puu (höylätty)	lamellit lappeel- laan	-	0,2	(DIN 1052:2004- 08)
sahatavara – kertopuu/vaneri	-	-	0,45*	(SFS-EN 12195-1)
höylätty puu – kertopuu/vaneri	-	-	0,3*	(SFS-EN 12195-1)
puu - puu	-	-	0,2...0,5 (suosi- tus 0,4)	(Wallner-Novak et al. 2014)
sahapinta - sa- hapinta	pinta kontak- tissa kohtisuo- raan syitä vas- taan	0,30 tai 0,45**	-	(SFS-EN 1995-2)
sahapinta - sa- hapinta	pinta kontak- tissa syiden suunnassa	0,23 tai 0,35**	-	(SFS-EN 1995-2)
höyläpinta - höyläpinta	pinta kontak- tissa kohtisuo- raan syitä vas- taan	0,20 tai 0,40**	-	(SFS-EN 1995-2)
höyläpinta - höyläpinta	pinta kontak- tissa syiden suunnassa	0,17 tai 0,30**	-	(SFS-EN 1995-2)
sahapinta - höy- läpinta	pinta kontak- tissa kohtisuo- raan syitä vas- taan	0,30 tai 0,45**	-	(SFS-EN 1995-2)
sahapinta - höy- läpinta	pinta kontak- tissa syiden suunnassa	0,23 tai 0,35**	-	(SFS-EN 1995-2)

* Jos kontaktipintoja ei ole pyyhitty puhtaaksi lumesta ja jäädästä, ei saa käyttää kitkakerrointa, joka on suurempi kuin 0,2

** Puun kosteuspitoisuuksilla $\leq 12\%$ ja $\geq 16\%$ samassa järjestyksessä

Kitkakertoimet sijoittuvat kirjallisuudessa yleensä 0,1 ja 0,5 välille. Monessa kontaktiparissa on otettu huomioon luvussa 4.1 esitettyjä asioita, kuten syiden suunta, kosteuspitoisuus ja kontaktipintojen laatu. Puupintojen kitka on kuitenkin usein riippuvainen useasta samanaikaisesta tekijästä, ja erityisesti puulajista. Kahden tai useamman kitkaan vaikuttavan tekijän samanaikaisuus otetaan huomioon harvoin kirjallisuudessa ja standardeissa. Taulukosta voidaan huomata, että monet kitkakertoimet on määritetty vain sahatavarapuulle. Insinööripuutuotteiden, kuten LVL:n ja CLT:n, kitkatutkimus on varhaisessa vaiheessa eikä selkeää konsensusta näiden materiaalien kitkakerroin-arvoista ole vielä määritetty. Taulukon arvot havainnollistavat väitteen, että puun kitkakertoimia ei saa käyttää suunnittelussa mielivaltaisesti. On tärkeää varmistaa, että kirjallisuudessa annettu kitkakerroin on testattu samoissa olosuhteissa ja samalla puulajilla kuin kerrointa on suunniteltu käytettäväksi.

5 Kitkan selvittäminen massiivipuussa kokeellisin menetelmin

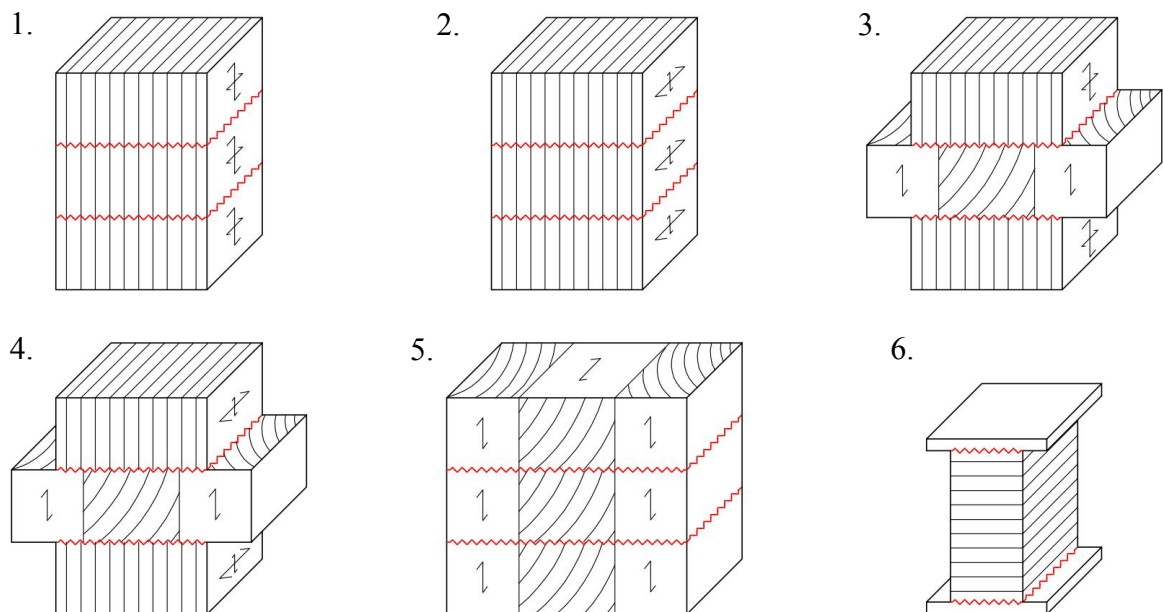
Luvussa 2.3 esitettiin neljä eri vaakaliitosdetaljia kantavien väliseinien ja välipohjien liitoksesta. Detaljien suunnittelun tueksi ja mitoittavan vaakavoiman vähentämiseksi, kitkaa tutkittiin detaljeissa olevilla samoilla kitkapinnoilla. Seuraavissa luvuissa käsitellään tutkimusmateriaalien perustiedot, tutkimusolosuhteet ja -järjestelyt sekä miten mittaustuloksia tulkitaan tilastollisen merkitsevyyden näkökulmasta. Lopuksi esitetään koestusten tulokset materiaalipareittain sekä kokeissa tehdyt havainnot.

5.1 Tutkimusmateriaalit, -kappaleet ja -olosuhteet

Tässä tutkimuksessa kitkan suuruutta selvitettiin neljällä eri materiaaliparilla ja kuudella eri yhdistelmällä (Kuva 31):

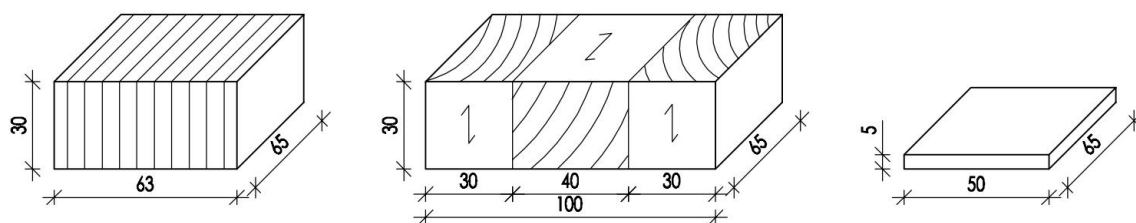
1. LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan
2. LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa
3. CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan
4. CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa
5. CLT-CLT, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan
6. LVL-teräs, LVL:n lapepinnat teräspintaa vastaan

Lisäksi koepareille 1. ja 5. suoritettiin 14 vuorokautta kestävä pitkäaikaiskoestus materiaaliparia kohden. Materiaalipari 1. edustaa luvun 2.3.1 detaljia, materiaalipari 3. luvun 2.3.2 detaljia, materiaalipari 5. luvun 2.3.3 detaljia ja materiaalipari 6. luvun 2.3.4 detaljia. Vertailun vuoksi parien 2. ja 4. avulla päätettiin tutkia miten LVL:n kantosuunta vaikuttaa kitkan suuruuteen pareihin 1. ja 3. verrattuna.



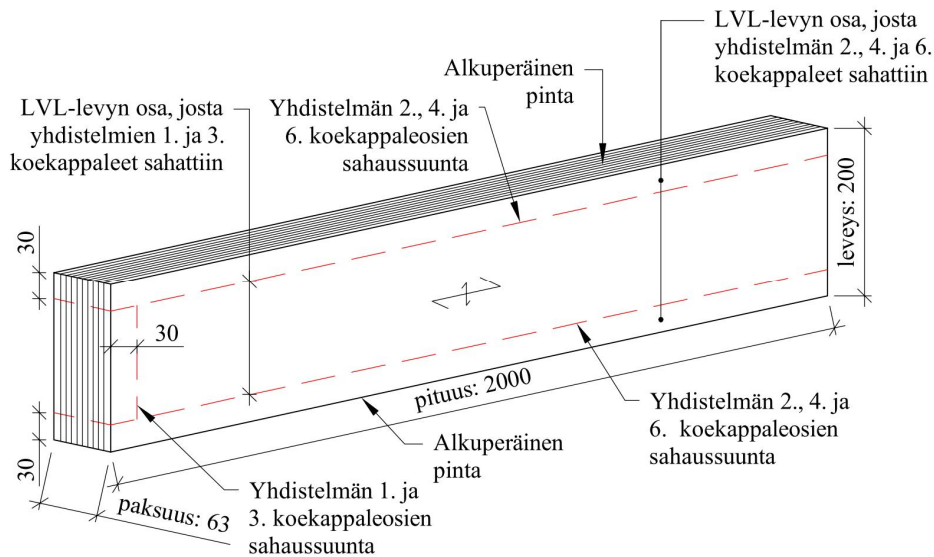
Kuva 31. Tutkitut materiaalipariyhdistelmät ja koekappaleiden syiden suunnat. LVL- ja CLT-kappaleiden pääkantosuunta on merkattu isolla nuolella ja sekundaarisuunta pienellä nuolella. Kappaleiden välisten kitkapintojen rajapinnat on merkitty siksak-viivalla.

Kokeet suoritettiin Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitoksen rakennetekniikan koehallissa 20.-22.6, 26.-28.6. ja 26.-27.7.2017 välisinä aikoina. Pitkäaikaiskokeet suoritettiin kahdena peräkkäisenä 14 vuorokauden ajanjaksona välillä 28.6.-26.7.2017. LVL-koekappaleiden materiaali oli LVL by Stora Enso X-laatua. CLT-koekappaleiden levytystyyppi oli C3s, joka oli lujuudeltaan C24. Koestettava teräs oli hiomatonta rakennelattaterästä rakennetekniikan koehallin varastosta. Teräksen lujuudesta ja pinnan karheudesta ei ole tietoa. Rakennetekniikan koehallissa ei ollut laitteistoa pinnan karheuden mittaamiseen. Levytyypin C3s paksuus oli 100 mm, jonka molemmat ulkolamellit olivat 30 mm paksuja ja keskilamelli 40 mm paksu. LVL-levyn paksuus oli 63 mm ja teräslatan paksuus 5 mm. LVL-koekappaleiden koko (korkeus x leveys x pituus) oli 30x63x65, CLT-koekappaleiden koko 30x100x65 ja teräskoekappaleiden 5x50x65 (Kuva 32). Alun perin kokeen suunnitteluvaiheessa CLT-koekappaleiden paksuus oli 60 mm. Tällä pyrittiin siihen, että kaikkien puisten koekappaleiden kontaktipinta-alan suuruus olisi ollut lähes sama. 100 mm paksuuteen päädyttiin tämän työn resurssien puitteista, sillä vain 100 mm paksuista C3s-levyä oli koemateriaalin hankintahetkenä Stora Enson Loviisan varastossa.

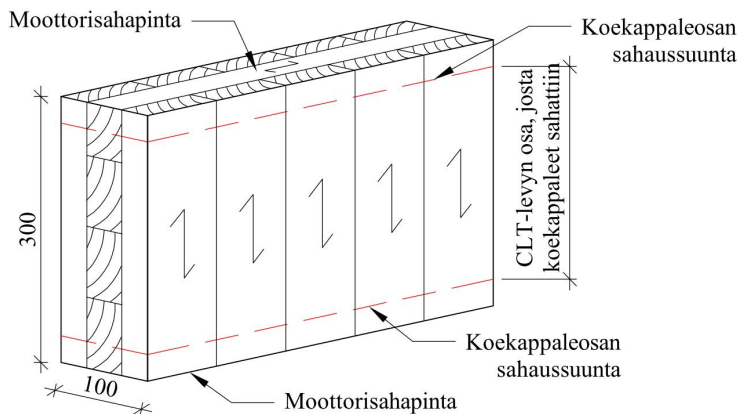


Kuva 32. LVL-, CLT- ja teräskoekappaleiden koot vasemmalta oikealle.

Sekä LVL- että CLT-koepalat sahattiin koehallin Felder K700 -pyörösahalla, jonka leikkausnopeus on 4800 RPM. LVL-koekappaleet sahattiin 200x63x2000 (leveys x paksuus x pituus) kokoisesta levystä. LVL-palkista sahattiin kaksi koekappaleosaa Kuva 33:n mukaisesti palkin pituussuuntaisesti ja useampi koekappaleosa palkin leveyssuuntaisesti. Näistä koekappaleosista sahattiin itse 65 mm pitkät koekappaleet. CLT-koepalat sahattiin kuudesta 300x100x1000 kokoisesta CLT-levystä (Kuva 34), jotka oli leikattu moottorisahalla suuremmasta elementistä ennen niiden toimittamista koehalliin. Lähtökohtana kitkakokeen suunnittelussa oli, että koestuksessa päästäisiin hyödyntämään mahdollisimman paljon LVL- ja CLT-levyjen alkuperäisen kaltaisia tehdaspintoja. Koska toimitettujen CLT-levyjen syrjäpinnat eivät olleet moottorisahauksen jälkeen alkuperäisessä, elementtitehtaalta tullessa kunnossa, päätettiin kokeissa käyttää vain rakennetekniikan koehallin pyörösahalla leikattuja pintoja. Koehallin pyörösahalla leikatut pinnat ovat samankaltaiset kuin LVL- ja CLT-elementtien tehdaspinnat, sillä molempien elementtien pinnat leikataan tehtaalla pyörösahalla noin 12 m/min ja 14 m/min leikkausnopeuksilla samassa järjestyksessä. Voidaan olettaa, että koehallin pyörösahalla leikatut pinnat ovat samankaltaiset kuin LVL- ja CLT-elementtien alkuperäiset pinnat. (Koukkunen 2017.)



Kuva 33. LVL-koemateriaali ja sen sahaussuunnat.

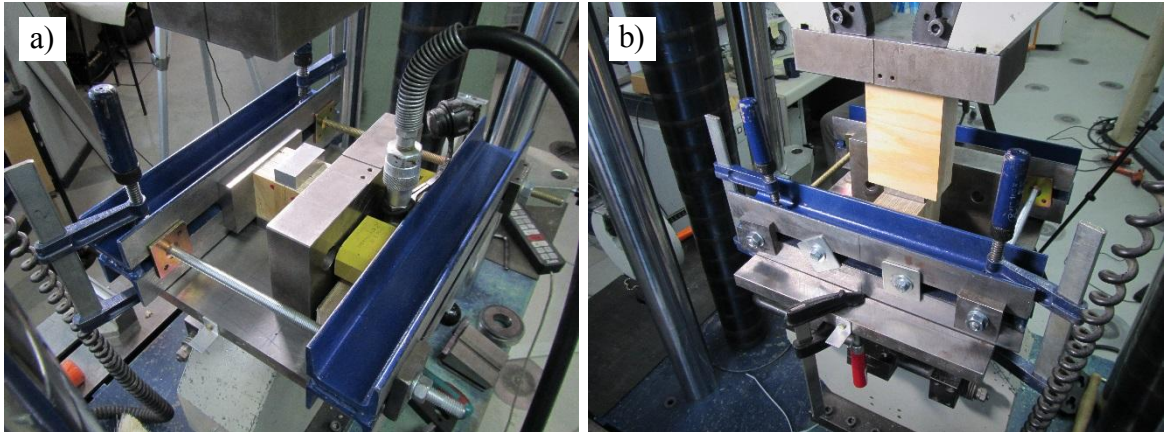


Kuva 34. CLT-koemateriaali ja sen sahauslinjat.

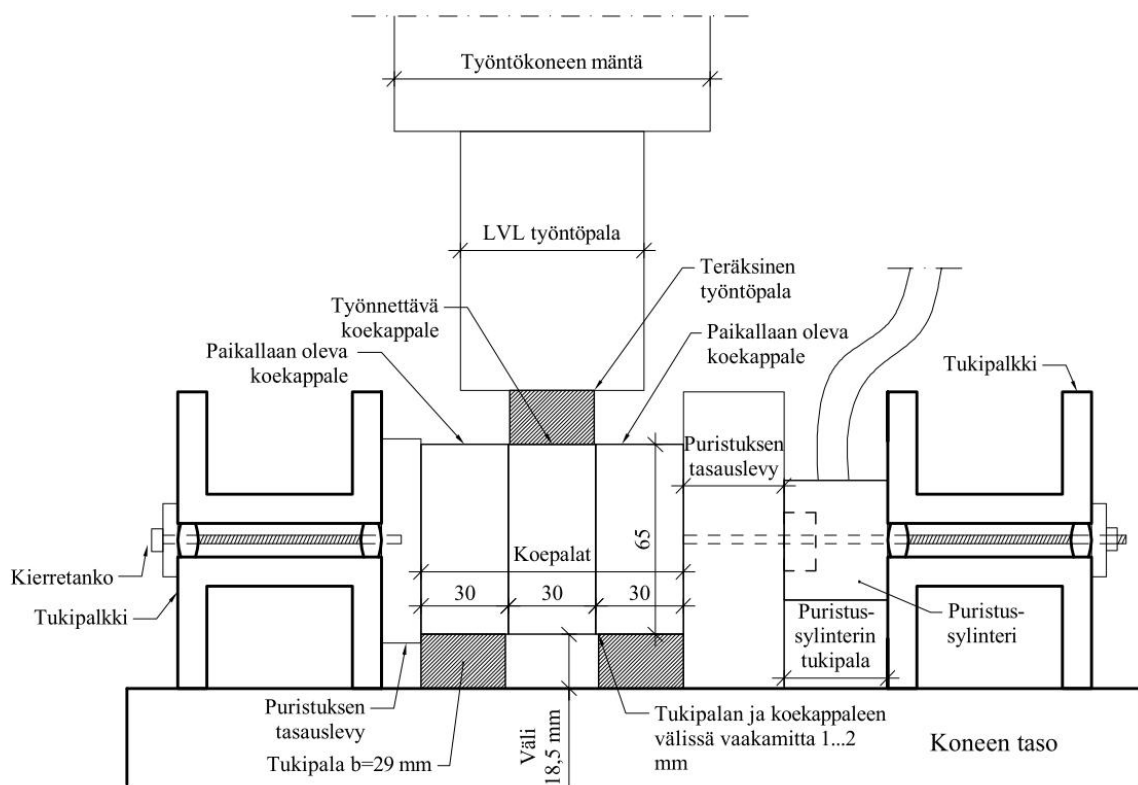
LVL- ja CLT-koekappaleet jätettiin sahauksen jälkeen olosuhdehuoneeseen, jonka ilman suhteellinen kosteus (RH%) on 45 % ja lämpötila +20 °C. LVL-kappaleet olivat olosuhdehuoneessa ennen ensimmäistä koestusta vähintään 15 vuorokautta ja CLT-kappaleet vähintään 5 vuorokautta. Koekappaleet jätettiin eri päivinä olosuhdehuoneeseen, sillä materiaalit saapuivat rakennetekniikan laboratorioon eri aikoina. Koekappaleet vietiin takaisin olosuhdehuoneeseen koestuspäivien jälkeen. Näillä olosuhdearvoilla puisten koekappaleiden tasapainokosteus on noin 9 % (Puuinfo 2011). Puiset koekappaleet sijoitettiin olosuhdehuoneeseen kappaleiden kosteuspitoisuuden vakioimiseksi. Koekappaleet olisi ollut mahdollista jättää olosuhdehuoneeseen, jonka ilman suhteellinen kosteus olisi ollut 65 % ja lämpötila +20 °C. Näitä olosuhteita käytetään yleisesti puisten materiaalien tutkimuksessa. Puisten koekappaleiden tasapainokosteus olisi ollut tällöin korkeampi suuremmalla ilman RH%:lla ja samalla lämpötilalla. Kuten luvussa 4.1.1 ”Kosteuspitoisuus” esitettiin, puun kitkakertoimien arvot kasvavat, kun tasapainokosteus lähestyy 30 % eli syiden kyllästymispistettä. LVL- ja CLT-koekappaleiden tasapainokosteuksien ollessa mahdollisimman matalia, voidaan selvittää näiden materiaalien alimmat mahdolliset kitkakertoimet käytössä olevilla koeolosuhteilla. Kitkakertoimien arvot ovat tällöin varmemmalla puolella, kun ne ovat mahdollisimman matalat.

5.2 Koejärjestely

Kitkakertoimien selvittämiseksi rakennetekniikan koehallin henkilökunnan kanssa kehitettiin koeasetelma (Kuva 35). Kuva 36:ssa on esitetty skemaattinen piirros koeasetelmasta. Kaikkien materiaaaliparien tarkemmat koeasetelmat on esitetty liitteessä 1. Yhdessä koestuksessa oli aina yhteensä kolme koekappaletta: kaksi ulkokappaletta ja yksi keskikappale. Ulkokappaleet lepäsivät tukipalojen päällä, ja keskikappale oli puristuksessa ulkokappaleiden välissä. Ennen koestusta kaikkien koekappaleiden ylä- ja alapinnat olivat samassa tasossa.



Kuva 35. Koejärjestely kahdesta kuvakulmasta.



Kuva 36. Skemaattinen piirros koejärjestelystä sivusta kuvattuna. Kyseellinen piirros on LVL-LVL-materiaaliparista. Muiden parien järjestely oli periaatteeltaan samanlainen.

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voitiin olettaa, että materiaaaliparien väliset kitkakertoimet laskevat, kun koekappaleihin kohdistuvan normaalivoiman, ja täten puristusjännityksen, suuruus kasvaa. Tässä diplomityössä haluttiin erityisesti tutkia, miten kitka käyttäytyy suhteellisen suurilla jännityksillä. LVL-LVL-, CLT-LVL- ja CLT-CLT-materiaaliparien puristusjännityksiksi valittiin $\sim 1 \text{ N/mm}^2$, $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ ja $\sim 10 \text{ N/mm}^2$. LVL-teräs-materiaaliparien jännityksiksi valittiin $\sim 1 \text{ N/mm}^2$, $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ ja $\sim 9 \text{ N/mm}^2$, sillä X-laadun ominaispuristuslujuus kohtisuoraan syitä vastaan on 9 N/mm^2 (Stora Enso 2017). Kutakin materiaaliparia koestettiin kolme kertaa kullakin puristusjännityksellä. Yhdelle materiaaliparille tuli yhteensä yhdeksän koestusta. Jokaisen materiaaliparin yksittäisessä koestuksessa käytettiin vain kerran kolmea yksittäistä koekappaletta. Yksittäistä koekappaletta kohti tuli vain yksi koestus. Koekappaleet olivat aina pyöröсахauksen jälkeisessä kunnossa ennen koestusta eikä yksittäistä koekappaletta käytetty kuin yhdessä koestuksessa. Koko kokeen aikana suoritettiin kaiken kaikkiaan 54 koestusta.

Yhdistelmän 1.LVL-LVL- ja 5.CLT-CLT-parin pitkäaikaiskoestuksille tehtiin yksi koestus kitkaparia kohden 14 vuorokautta kestäneen $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksen jälkeen. $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ jännitykseen päädyttiin edellä mainittujen materiaaliparien lyhytaikaiskokeiden tulosten ja havaintojen perusteella. 5.CLT-CLT-parin koekappaleet murtuivat ~ 5 ja $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ jännityksillä eikä pitkäaikaiskokeita voitu tästä syystä suorittaa näillä jännityksillä. 1.LVL-LVL-parille valittiin sama puristusjännitys pitkäaikaiskokeeseen, jotta nähtäisiin käyttäytyvätkö eri materiaalien pintojen kitkakertoimet eri tavalla pitkäaikaispuristuksen jälkeen. 5.CLT-CLT-koekappaleiden murtumisesta on esitetty luvussa 5.4.5. Koska pitkäaikaiskokeita tehtiin vain yksi materiaaliparia kohden, ei niitä voida verrata luotettavasti lyhytaikaiskokeiden tuloksiin. Pitkäaikaiskokeiden tulokset antavat kuitenkin viitearvon siitä, miten kitka kehittyy pitkäaikaisen paineen alaisuudessa. Tämän työn resurssien puitteissa pitkäaikaiskokeita ei voitu suorittaa useampaa samanaikaisesti, pitempää kuormitusaikaa eikä suuremmalla otantamäärällä. Koehallista kerätyn olosuhdedatan perusteella koehallin lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus nostavat pitkäaikaiskoekappaleiden puun tasapainokosteuden samaan noin 9% arvoon kuin olosuhdehuone lyhytaikaiskokeiden koekappaleilla. Pitkäaikaiskokeiden tulokset ovat vertailukelpoisia lyhytaikaiskokeiden tulosten kanssa RH:n suhteen.

Ulkoinen keskimmäiseen koekappaleeseen kohdistuva työntövoima saatiin aikaan Zwick RK 250/50 kuormituskoneella. Koekappaleihin kohdistuva puristava normaalivoima tuotettiin Enerpacin P-162 mallin hydraulisella käsipumpulla (Kuva 37a)) ja Enerpacin RC 50 B FOP mallin hydraulisella kaksoissyylinterillä (Kuva 37b)). Sylinterin ja pumpun välissä oli hana (Kuva 37c)), jolla pumpattu hydraulijäy ja paine saatiin suljettua halutulle vakiotasolle sylinteriin. Esikokeiden aikana huomattiin, että puristussyylinterin paine laskee hanan sulkeamisen jälkeen. Tästä syystä hanan toiseen letkuun asennettiin suurempi hydraulisyylinteri omaan erilliseen kehäänsä tasaamaan ja vakioimaan systeemin painetta. Pumpun painemittarin yksikkö oli kilopondi per neliösenttimetri (kp/cm^2). Pumpun painemittari kalibroitiin kilonewtoneiksi (kN) asettamalla sylinteri puristuskoneen voima-anturin alle, ja lukemalla pumpun mittarin paineen näyttämän mukainen voima eri suuruusilla paineilla. Puristusvoiman keskimääräiseksi muutoskertoimeksi saatiin $0,12343 \text{ kN}/(\text{kp/cm}^2)$, jonka avulla halutut puristusvoimat saatiin muutettua pumpun mittarin mukaisiksi lukemiksi. Taulukko 3:ssa on esitetty kunkin koeparin halutut puristusjännitykset, keskimmäisen kappaleen kontaktipinta-ala, haluttuun puristusjännitykseen vaadittu puristusvoima ja tätä voimaa vastaava hydraulisyylinterin paine.



Kuva 37. Hydraulinen käsipumppu, sylinteri ja hana.

Taulukko 3. Eri materiaaliparien puristusjännitysten määrittäminen.

Materiaalipari	Haluttu puristusjännitys (N/mm ²)	Keskimmäisen palkan kontaktipinta-ala (mm ²)	Puristukseen vaadittu voima (kN)	Sylinterin paine (kp/cm ²)
LVL-LVL	~1	(65*63) 4095	4	~33
LVL-LVL	~5	4095	20	~166
LVL-LVL	~10	4095	41	~332
CLT-LVL	~1	(65*63) 4095	4	~33
CLT-LVL	~5	4095	20	~166
CLT-LVL	~10	4095	41	~332
CLT-CLT	~1	(65*100) 6500	7	~53
CLT-CLT	~5	6500	33	~263
CLT-CLT	~10	6500	65	~527
LVL-teräs	~1	(65*30) 1950	2	~16
LVL-teräs	~5	1950	10	~79
LVL-teräs	~9	1950	18	~142

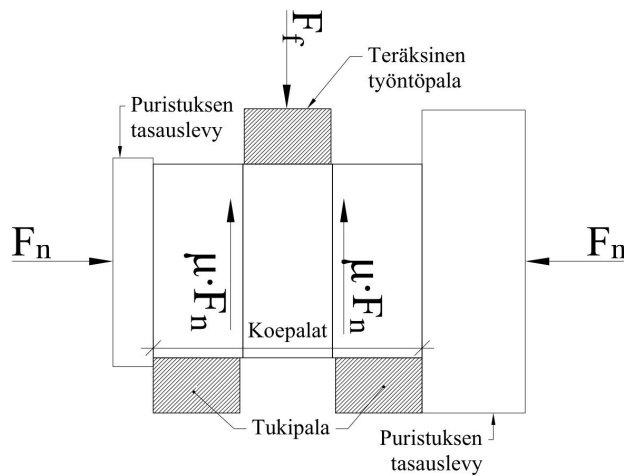
Kukin yksittäinen koestus merkattiin koeparin numeron (Kuva 31), keskimmäisen ja ulommaisten koepalan materiaalin, keskikappaleeseen kohdistuvan puristusjännityksen sekä koestuksen numeron yhdestä kolmeen. Kappaleet merkattiin seuraavasti: koeparin numero-keskimmäisen koepalan materiaali ja ulompien koepalojen materiaalit-puristusjännityksen suuruus-koestuksen numero. Materiaalit lyhennettiin seuraavasti: L=LVL, C=CLT ja T=teräs. Esimerkiksi CLT-LVL materiaaliparin 3. sarjan ensimmäinen koestus ~10 N/mm² puristusjännityksen alaisuudessa on 3.CL-10-1. Merkintätavan avulla voidaan tuloksia esittäessä viitata tehokkaasti yksittäiseen koestukseen, ja samalla ilmaista mikä materiaalipari ja puristusjännitys kyseen omaisessa koestuksessa on kyseessä.

Keskimmäistä koekappaletta painettiin alaspäin siirtymäohjattuna 5 mm/min kuormitusnopeudella 16 mm siirtymän verran. Siirtymäohjaukseen ja kuormitusnopeuden suuruuteen päädyttiin, sillä vastaavanlaisissa puun kitkatutkimuksissa käytettiin kuorman siirtymäohjausta saman kokoluokan kuormitusnopeuksilla (Seki et al. 2013; Park et al. 2011; Aira et al. 2014; Koubek & Dedicova 2014). Liukukitkavoima voidaan määrittää luotettavasti siir-

tymäohjattuna. Siirtymäohjauksen puutteena kuitenkin on, että sillä ei voida määrittää lepokitkavoimaa riittävän tarkasti (Puttonen 2017). Työntökoneen voima-anturi piirsi kuvaajana keskimmäisen kappaleen liikuttamiseen vaaditun voiman keskikappaleen siirtymän funktiona. Kitkakertoimet määritettiin soveltamalla kaavaa (16) Kuva 38:n mukaisilla voimilla seuraavasti:

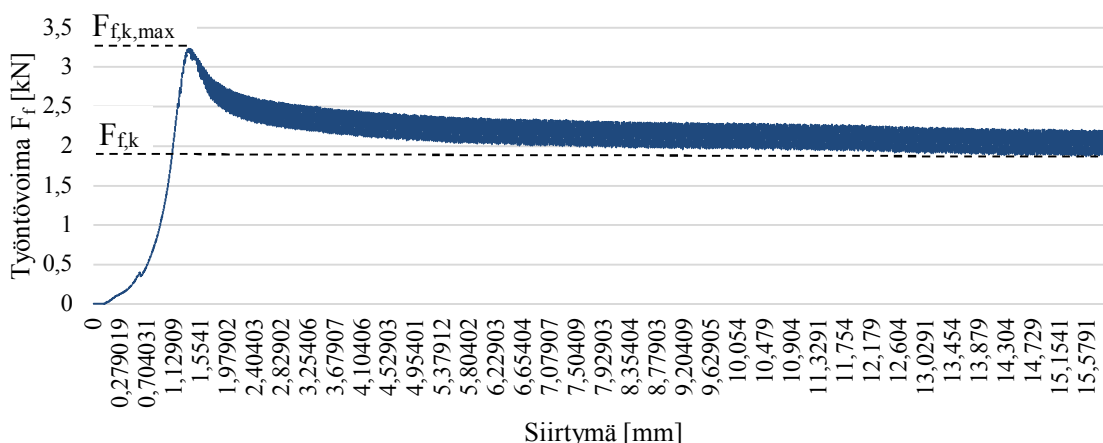
$$\mu = \frac{F_f}{2 \cdot F_n} \quad (21)$$

missä F_n on koekappaleisiin vaikuttava puristava normaalivoima [N]
 F_f on keskikappaleeseen vaikuttava työntävä voima, joka jaetaan kahdella, sillä kitkapintoja on kaksi [N]



Kuva 38. Koekappaleisiin vaikuttavat voimat.

Koska lepokitkavoimaa ei voida määrittää luotettavasti siirtymäohjauksella, kokeessa selvitettiin materiaaliparien maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimet. Maksimiliukukitkakertoimet määritettiin suurimman työntövoiman perusteella, joka syntyi juuri ennen kuin keskikappale lähti liikkeelle. Liukukitkakertoimet määritettiin pienimmän työntövoiman perusteella, joka tapahtui maksimiliukukitkavoiman ylittymisen jälkeen. Määraävät työntövoimat $F_{f,k,max}$ ja $F_{f,k}$ maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimille saatiin Kuva 39:n mukaisesti. Useassa koestuksessa liukukitkassa havaittiin suurta stick-slip-liikettä. Toinen vaihtoehto liukukitkakertoimen määrittämiseen olisi ollut laskea keskiarvo stick-slip-alueen työntövoimien vaihtelusta. Koestusten tuloksista havaittiin, että liukukitka-alueen työntövoimat eivät tasoituneet suhteellisen lyhyen työntömatka johdosta. Liukukitkavoimat laskivat lähes jokaisessa koestuksessa koko kuormitusjakson ajan. Kun liukukitkakertoimet määritetään pienimmästä mahdollisesta työntövoimasta, voidaan tämän tutkimuksen puitteissa todeta liukukitkakertoimien olevan varmalla puolella. Kaikkien koestusten työntövoima-siirtymä-kuvaajat on esitetty liitteessä 2.



Kuva 39. Koekappaleen siirtymä ulkoisen työntövoiman funktiona.

5.3 Tulosten tilastollinen arviointi

Tutkimuksessa haluttiin selvittää maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimien verrannollisuutta puristusjännityksen suuruuteen. Koetuloksista haluttiin selvittää, mitä kitkakertoimien suuruudelle tapahtuu, kun puristusjännitys nousee ja ovatko kitkakertoimet tilastollisesti riippuvaisia puristusjännityksen muutoksesta. Kitkakertoimet merkittiin niiden määrittämisen jälkeen pisteakaavioon puristusjännitysten suhteen. Pisteakaavioista huomattiin taulukkolaskentaohjelma Excel 2016:n Kaaviotyökalun trendiviivan muodon avulla miten kitkakertoimien arvot muuttuvat. Pintojen välisen kitkan käyttäytymisen arvioimiseksi mittausaineistolle tehtiin regressioanalyysi, joka kuvaa aineiston tilastollista käyttäytymistä ja luotettavuutta. Tulosten trendiviivojen havaittiin käyttäytyvän lineaarisesti, eksponentti-, potenssi-, logaritmi- ja toisen asteen polynomifunktion mukaisesti.

Regressioanalyysin avulla on mahdollista analysoida yhden tekijän tai muuttujan riippuvuutta toisista tekijöistä tai muuttujista, kun riippuvuus ei ole eksaktia vaan tilastollista (Mellin 2006, s.267). Jos toisen muuttujan arvot voidaan ennustaa tarkasti toisen saamien arvojen perusteella, muuttujien välinen riippuvuus on eksaktia. Jos muuttujien välillä ei ole eksaktia riippuvuutta, mutta toisen muuttujan arvoja voidaan käyttää apuna toisen muuttujan arvojen ennustamiseen, muuttujien välinen riippuvuus on tilastollista. (Mellin 2006, s.240.) Muuttujien välisten riippuvuuksien analysointi tapahtuu rakentamalla tilastollinen malli, jota kutsutaan regressiomalliksi. Regressiomalli pyrkii selittämään jonkin selitettävän tekijän tai muuttujan havaittujen arvojen vaihtelun joidenkin selittävien tekijöiden tai muuttujien havaittujen arvojen vaihtelun avulla. (Mellin 2006, s.267.) Tässä regressioanalyysissä selitettävä tekijä on kitkakerroin ja selittävä tekijä puristusjännitys.

Itse regressioanalyysi suoritettiin koetuloksista Excel 2016:n Analyysityökalut-apuohjelman Regressio-analyysityökalulla. Mittaustulokset linearisoitiin tarvittaessa analyysiä varten trendiviivojen vaatiman funktion mukaisesti. Eri muotoisten trendiviivafunktioiden muunnokset selostetaan myöhemmin tässä luvussa. Ennen tulosten läpikäymistä on soveliaista käsitellä olennaiset regressioanalyysin termit ja käsitteet. Koska selittäviä tekijöitä on tämän työn yhteydessä vain yksi ja kaikissa erimuotoisissa regressiomalleissa on samoja muuttujia ja vakioita, esitellään regressiomallin ja sen osat tarkemmin yhden selittäjän lineaarisen regressiomallin kautta. Yhden selittäjän lineaarinen regressiomalli on muodoltaan yleensä seuraava

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (22)$$

missä y_i on selitettävän muuttujan y satunnainen ja havaittu arvo havaintoyksikössä i
 x_i on selittäjän eli selittävän muuttujan x ei-satunnainen ja havaittu arvo havaintoyksikössä i
 ε_i on residuaalin eli jäännöstermin ε satunnainen ja ei-havaittu arvo havaintoyksikössä i
 β_0 on ei-satunnainen ja tuntematon vakio eli vakioselittäjän regressiokerroin
 β_1 on selittäjän x ei-satunnainen ja tuntematon regressiokerroin

Regressiokertoimet β_0 ja β_1 sekä selittäjä x_i muodostava regressiomallin systemaattisen osan eli rakenneosan. Jäännöstermi ε_i muodostaa mallin satunnaisen osan. Muuttujan \hat{y}_i sovitte eli estimoidun regressiosuoran selitettävälle muuttujalle y antama arvo havaintopisteessä x_i saadaan kaavalla

$$\hat{y}_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

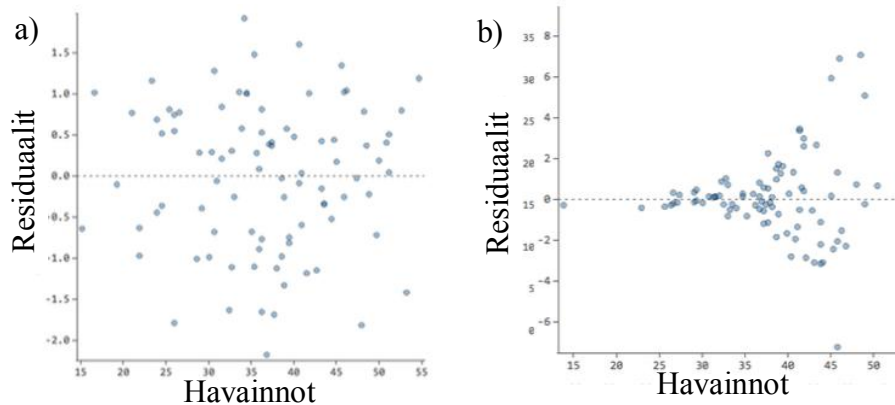
Estimoidun mallin residuaali $\hat{\varepsilon}_i$ on selitettävän muuttujan y havaitun arvon y_i ja sovitteen \hat{y}_i antaman arvon erotus

$$\hat{\varepsilon}_i = y_i - \hat{y}_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

Regressiomalli selittää selitettävän muuttujan havaittujen arvojen vaihtelun sitä paremmin mitä lähempänä sovitteet ovat selitettävän muuttujan havaittuja arvoja. Toisin sanoen, regressiomalli selittää selitettävän muuttujan havaittujen arvojen vaihtelun sitä paremmin mitä pienempiä estimoidun mallin residuaalit ovat. Estimoidun mallin residuaaleista voidaan piirtää kuvio, jota kutsutaan residuaalidiagrammiksi. Diagrammin avulla voidaan tutkia regressiomallin hyvyttä.

Residuaalidiagrammissa pisteet muodostavat vaakasuoran vyömäisen pistepilven tai -parven, kun regressiomalli on täsmennetty oikein. Kuvion pisteet ovat vyömäisesti, kun ne muodostavat edetessä vasemmalta oikealle yleisilmeeltään tasaleveän pilven, jossa ei näy poikkeavia havaintoja (Kuva 40 a)). Jos pistepilvi on käyrästynyt, regressiomallin rakenneosa on mahdollisesti spesifioitu eli täsmennetty väärin. Jos pistepilvi levenee esimerkiksi oikealle tai vasemmalle, eli pilvi ei ole tasaleveä, regressiomallin residuaali saattaa olla heteroskedastinen (Kuva 40 b)). Jäännöstermien heteroskedastisuus saattaa myös viitata mallin rakenneosan väärään täsmennykseen. (Mellin 2006, s.393.) Heteroskedastisuus ei vaikuta haitallisesti regressiokertoimien arvoihin. Sillä voi tosin olla vaikutusta kertoimien tilastolliseen merkitsevyyteen. Tämä voi johtaa tilanteeseen, missä esimerkiksi tietty muuttuja ei näytä

olevan tilastollisesti merkitsevä y_i :n selittäjä, vaikka todellisuudessa se saattaa olla merkitsevä. (Mattila 2003a.)



Kuva 40. a) Kuvaaja, jossa residuaalit ovat asettuneet diagrammiin ideaalisesti ja b) kuvaaja, jossa residuaalit ovat heteroskedastisesti (Statwing 2014).

Taulukko 4:ssä on esitetty erimuotoisten regressiomallien funktioiden muodot ja niiden mahdolliset linearisoinnit. Selitettävien muuttujien y ja selittävien muuttujien x tulokset on muunneltu oheisen taulukon mukaisesti ennen Regressio-analyysityökalun käyttöä. Eksponentti- ja potenssifunktioiden muotoisten mittaustulosten regressioanalyysissä käytettiin linearisoituja muotoja. Logaritmi- ja toisen asteen polynomifunktioiden muotoisten datojen kanssa käytettiin mallien normaaleja muotoja.

Taulukko 4. Regressiofunktiot, niiden mallit ja mahdolliset linearisoinnit (Young 2017).

Regressiofunktio	Regressiomallin muoto	Regressiomallin linearisoitu muoto
Eksponenttifunktio	$y_i = \beta_0 + e^{\beta_1 \cdot x_i}$	$\ln(y_i) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \cdot x_i$
Potenssifunktio	$y_i = \beta_0 + x_i^{\beta_1}$	$\log_{10}(y_i) = \log_{10}(\beta_0) + \beta_1 \cdot \log_{10}(x_i)$
Logaritmifunktio	$y_i = \beta_0 \cdot \ln(x_i) + \beta_1$	-
Toisen asteen polynomifunktio	$y_i = \beta_2 \cdot x_i^2 + \beta_1 \cdot x_i + \beta_0$	-

Regressioanalyysissä yksi oleellisimmista asioista on selvittää, kuinka hyvin selittävän muuttujan x havaittujen arvojen vaihtelu selittää muuttujan y havaittujen arvojen vaihtelua. Tähän kysymykseen pyritään vastaamaan niin sanotun varianssihajotelman avulla. (Ilmonen 2016.) Varianssihajotelma motivoi määrittelemään estimoidun mallin selitysasteen kaavalla

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = \frac{SSM}{SST} \quad (25)$$

missä SSE on estimoidun mallin residuaalien eli jäännösvirheiden vaihtelua kuvaava jäännösneliösumma [-]
 SST on selitettävän muuttujan y arvojen vaihtelua kuvaava kokonaisneliösumma [-]
 SSM on estimoidun mallin malli- eli regressioneliösumma [-]

Jäännösneliösumma SSE ja kokonaisneliösumma SST määritetään kaavojen (26) ja (27) avulla (Mellin 2006, s.303-304).

$$SSE = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (26)$$

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (27)$$

missä \bar{y} on selitettävän muuttujan y havaittujen arvojen aritmeettinen keskiarvo [-]

Varianssihajotelmasta seuraa, että aina pätee $0 \leq R^2 \leq 1$. Selitysaste mittaa estimoidun regressiomallin hyvyttä. (Mellin 2006, s.307.) Mitä suurempi on mallineliösumman SSM osuus kokonaisneliösummasta SST, sitä paremmin malli selittää selitettävän muuttujan havaittujen arvojen vaihtelun. Toisin sanoen, mitä pienempi on jäännösneliösumman SSE osuus kokonaisneliösummasta SST, sitä paremmin estimoitu malli selittää selitettävän muuttujan havaittujen arvojen vaihtelun. Selitysaste ilmaistaan tavallisesti prosentteina $100R^2\%$ (Ilmonen 2016.)

Kun regressiomalli on luotu, on syytä tarkastella mallin satunnaisvirhettä. P-arvo ilmaisee todennäköisyyden sille, että sattumalta saataisiin yhtä suuri ero koeryhmien välille kuin mikä koestuksessa havaittiin. Mitä pienempi p-arvo on, sitä varmemmin havaittu ero on todellinen, ja että eroavaisuus ei synny sattuman vaikutuksesta. Yleensä tuloksia pidetään tilastollisesti merkitsevinä, jos p-arvo on pienempi kuin 0,05. (Juutilainen & Tuomisto 2002.) Tässä tutkimuksessa p-arvolle käytetään samaa 0,05 rajaa. Regressiomallin p-arvo määritetään F-testisuureen avulla, joka lasketaan mallin selitysastetta R^2 hyväksikäyttäen kaavan (28) mukaan (Mellin 2006, s.361). Excel 2016:n Regressio-analyysityökalu määrittää regressiomallin F-testisuureen automaattisesti, ja laskee tämän perusteella p-arvon mallille.

$$F = \frac{va_2}{va_1} \cdot \frac{R^2}{1 - R^2} = \frac{n - k - 1}{k} \cdot \frac{R^2}{1 - R^2} \quad (28)$$

missä n on havaintojen lukumäärä [-]
 k on selittävien muuttujien lukumäärä [-]
 R^2 on regressiomallin selitysaste [-]

Voidaan ajatella, että eri materiaaliparien regressiokäyrät kuvaavat kitkakertoimien keskiarvojen muutosta koekappaleiden välisen puristusjännityksen suhteen. Tästä syystä tulee tar-

kastella myös epävarmuutta regressiokäyrien ennustettujen keskiarvojen suhteen, kun kitkakertoimien suunnitteluarvoja määritetään. Olennaista on myös, miten epävarmuus muuttuu puristusjännityksen funktiona. Tätä epävarmuutta kuvataan variaatiokertoimella. (Puttonen 2017.) Variaatiokerroin muodostetaan otoksen keskihajonnan ja aritmeettisen keskiarvon avulla (Mattila 2003b).

Keskihajonta on yksi yleisimmin käytetyistä hajontaluvuista välimatka- tai suhdeasteikon muuttujille. Keskihajonnalla kuvataan sitä, kuinka kaukana yksittäiset muuttujan arvot ovat keskimäärin muuttujan aritmeettisesta keskiarvosta. Keskihajonta voidaan laskea perusjoukolle eli materiaaliparin kaikille maksimiliukukitka- tai liukukitkakertoimille. Koska tässä työssä halutaan selvittää kitkakertoimien vaihtelua puristusjännityksen muutoksiin nähden, keskihajonta tulee laskea käyttäen otoskeskihajontaa. Osojoukkona käytetään materiaaliparien mitattuja kitkakertoimia kullekin puristusjännitykselle. Osokeskihajonta lasketaan kaavalla (29). Variaatiokerroin suhteuttaa keskihajonnan aineiston keskiarvoon. Variaatiokerroimen avulla useamman eri otoksen keskinäinen vertailu on mielekkäämpää, koska keskihajonta vaihtelee aineiston keskiarvon myötä. Variaatiokerroin voidaan laskea otoskeskihajonnan määrittämisen jälkeen kaavalla (30). (Mattila 2003b.)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (29)$$

missä n on havaintojen lukumäärä [-]
 x_i on selittäjän eli selittävän muuttujan x ei-satunainen ja havaittu arvo havaintoyksikössä i [-]
 \bar{x} on selittävän muuttujan x havaittujen arvojen aritmeettinen keskiarvo [-]

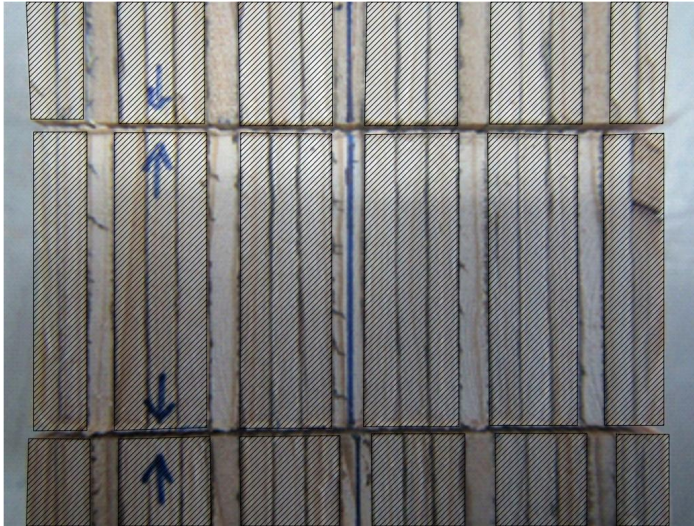
$$c_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (30)$$

missä σ on otoskeskihajonta [-]

5.4 Tulokset

5.4.1 LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan

Materiaalikoeparin 1. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 5:ssä ja liukukitkakertoimet Taulukko 6:ssa variaatiokertoimineen. Koestusta 1.LL-1-1 ja pitkäaikaiskoestusta 1.LL-1-1 (14 vrk) lukuun ottamatta, kaikissa koestuksissa esiintyi suurta stick-slip-liikettä kappaleiden ollessa liikkeessä. Nykivä stick-slip-ilmiö oli suurinta puristusjännityksen ollessa $\sim 10 \text{ N/mm}^2$. Lisäksi huomattiin, että mitä suuremmaksi puristusjännitys kasvoi, sitä enemmän koepalojen viilut deformaatioivat (Kuva 41). Erityisesti $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksella pääkantosuunnan viilut, jonka syyt olivat kitkapintoja vastaan kohtisuoraan, muuttivat muotoaan, mutta eivät tavattomasti.



Kuva 41. Koekappaleet koestuksen 1.LL-10-2 jälkeen. Rajapintoihin on muodostunut sahalaitainen muoto viilujen deformatumisesta. Rasteroitujen viilujen syyt ovat kohtisuoraan kontaktipintoja vastaan.

Taulukko 5. 1.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

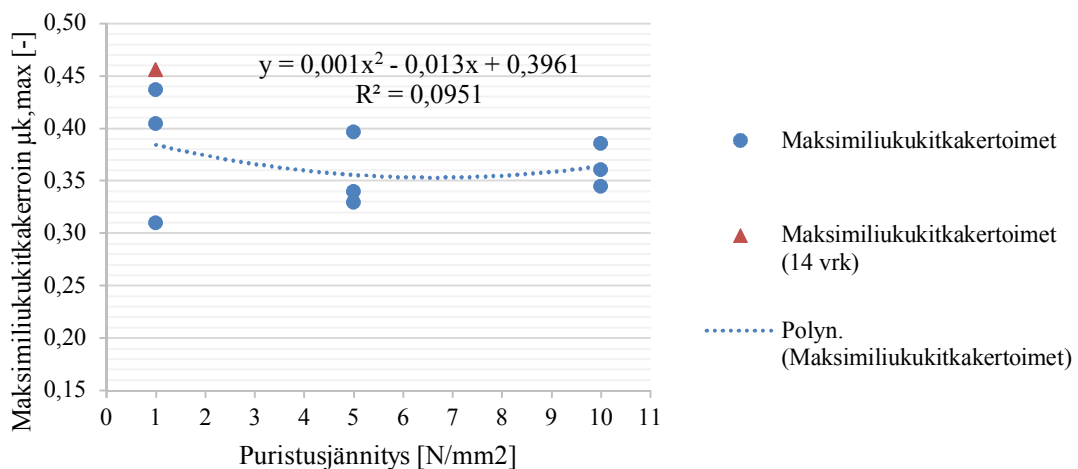
	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~10 N/mm ²)
Maksimiliukukitkakertoimet	0,44	0,40	0,35
$\mu_{k,max}$ (-)	0,31	0,33	0,39
	0,41	0,34	0,36
Maksimiliukukitkakertoimien $\mu_{k,max}$ variaatiokerroin c_v (%)	17	10	6
Pitkäaikaiskoestuksen maksimiliukukitkakerroin $\mu_{k,max,14vrk}$ (-)	0,46	-	-

Taulukko 6. 1.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~10 N/mm ²)
	0,23	0,23	0,21
Liukukitkakertoimet μ_k (-)	0,19	0,19	0,21
	0,23	0,21	0,22
Liukukitkakertoimien μ_k variaatiokerroin c_v (%)	11	10	3
Pitkäaikaiskoestuksen liukukitkakerroin $\mu_{k,14vrk}$ (-)	0,29	-	-

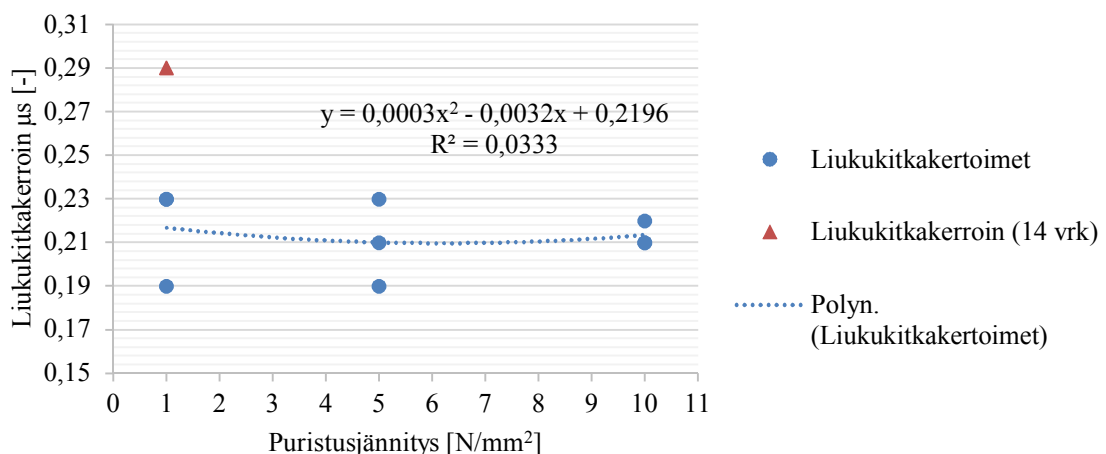
LVL-koepalojen pääkantosuunnan syiden ollessa kohtisuoraan kitkapintoja vastaan sekä maksimiliukukitka- että liukukitkakertoimien trendiviivojen havaittiin esiintyvän tehokkaimmin toisen asteen polynomifunktion mukaisesti (Kuva 42 ja Kuva 43). 14 vuorokautta kestäneen $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksen pitkäaikaiskoestuksen jälkeen molemmat kitkakertoimet olivat suuremmat kuin yksikään vastaavan puristusjännityksen kitkakerroin. Maksimiliukukitkakertoimet sijoittuivat välille 0,31-0,44 ja liukukitkakertoimet välille 0,19-0,23 kaikilla puristusjännitysten suuruuksilla. Erityisesti puristusjännityksillä $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ ja $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ liukukitkakertoimien arvot asettuivat samalle välille. Sekä maksimiliukukitka- että liukukitkakertoimien variaatiokertoimet laskivat selvästi kappaleiden välisen puristusjännityksen noustessa (Kuva 44). Tämä on nähtävissä myös kuvista 42 ja 43, sillä kitkakertoimien arvot asettuvat pienemmälle välille $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksella kuin pienemillä puristuksilla.

1.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet



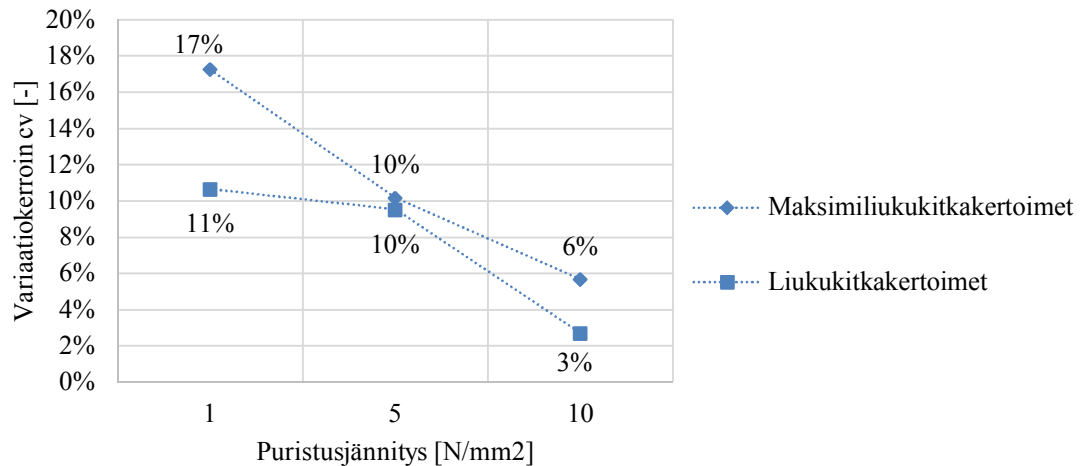
Kuva 42. 1.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

1.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet



Kuva 43. 1.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

1.LVL-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



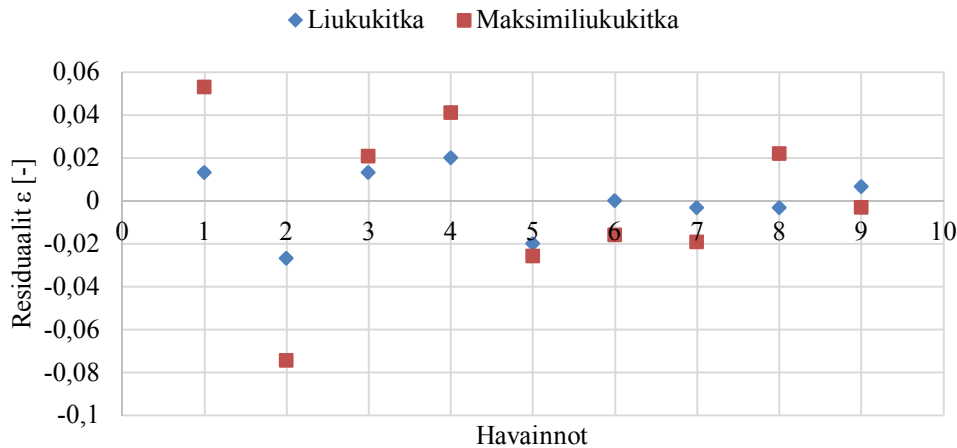
Kuva 44. 1.LVL-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

Taulukko 7:ssä esitettyjen regressiomallien selitysasteiden mukaan kumpikaan malli ei selitä käytännössä ollenkaan maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimien arvojen muutosta puristusjännityksen suhteen. Kuvia 42 ja 43 tarkastellessa tämä ei ole arvaamatonta, sillä mittaus tulokset ovat levittyneet tasaisen laajasti pistediagrammeihin. Myös p-arvojen mukaan mallit eivät ole tilastollisesti merkitseviä. Näiden regressiomallien perusteella voidaan todeta, että 1.LVL-LVL-parilla maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimet eivät näytä olevan millään tavalla verrannollisia rajapinnoissa vaikuttavan puristusjännityksen kanssa. Molempien mallien residuaalidiagrammit ovat vasemmalta heteroskedastisia (Kuva 45). Residuaalien mukaan regressiomallit selittävät kitkakertoimien vaihtelun paremmin, kun puristusjännitykset kappaleiden välillä ovat suuremmat.

Taulukko 7. 1.LVL-LVL-parin regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	9,5	0,7410
Liukukitkakertoimen malli	3,3	0,9033

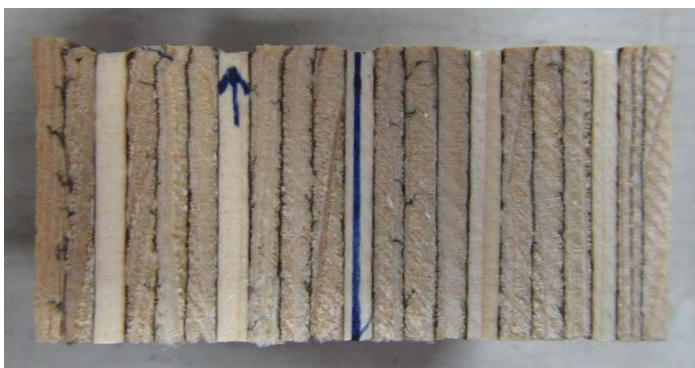
1.LVL-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



Kuva 45. 1.LVL-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

5.4.2 LVL-LVL, pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa

Materiaalikoeparin 2. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 8:ssä ja liukukitkakertoimet Taulukko 9:ssä variaatiokertoimineen. Stick-slip-liikettä esiintyi huomattavasti vähemmän kuin koeparilla 1. Selkeää stick-slip-liikettä esiintyi vain neljässä koestuksessa yhdeksästä. Koeparin 2. stick-slip-ilmiöt eivät jakautuneet tietylle puristusjännityksen suuruudelle vaan ilmiötä havaittiin kaikilla puristuksilla. Yleisintä stick-slip oli kahdessa $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksen alaisessa koestuksessa. Kuten koeparilla 1., LVL-koekappaleiden viilut deformatuivat puristusjännityksen kasvaessa (Kuva 46). Deformoituminen oli silminnähden selkeämpää kuin koeparilla 1. $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksella pääkantosuunnan joka neljäs viilu, jonka syyt olivat kitkapintoja vastaan kohtisuoraan, deformatui enemmän kuin muut viilut, jotka olivat kitkapintojen kanssa samansuuntaiset.



Kuva 46. Toinen ulommista koekappaleista koestuksen 2.LL-10-2 jälkeen. Erityisesti joka neljäs pääkantosuunnan viilu muutti huomattavasti muotoaan. Deformoituminen oli suurempaa kuin koeparilla 1.

Taulukko 8. 2.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

Puristusjännitys ($\sim 1 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 5 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 10 \text{ N/mm}^2$)
---	---	--

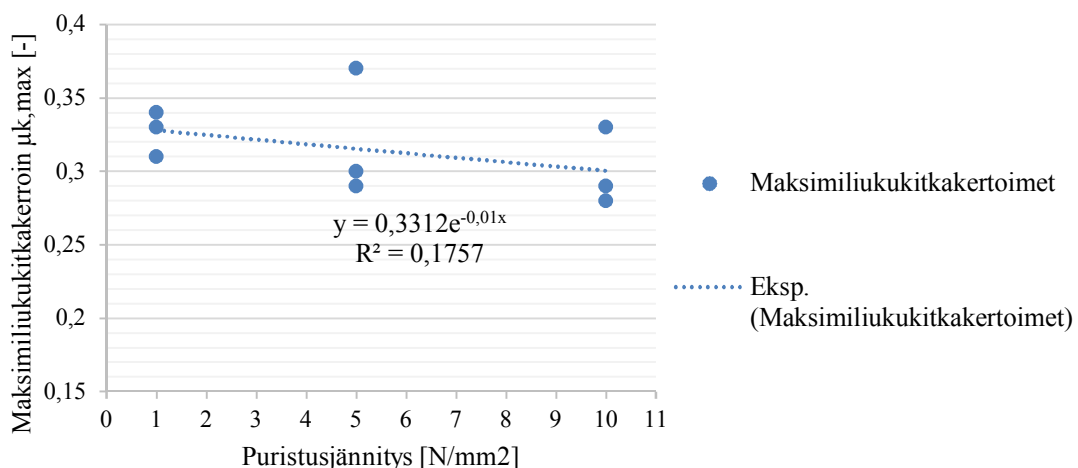
	0,31	0,30	0,29
Maksimiliukukitkakertoimet	0,34	0,29	0,28
$\mu_{k,max}$ (-)	0,33	0,37	0,33
Maksimiliukukitkakertoimien $\mu_{k,max}$ variaatiokerroin c_v (%)	5	14	9

Taulukko 9. 2.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~10 N/mm ²)
	0,17	0,18	0,21
Liukukitkakertoimet μ_k (-)	0,16	0,18	0,19
	0,16	0,22	0,25
Liukukitkakertoimien μ_k variaatiokerroin c_v (%)	4	12	14

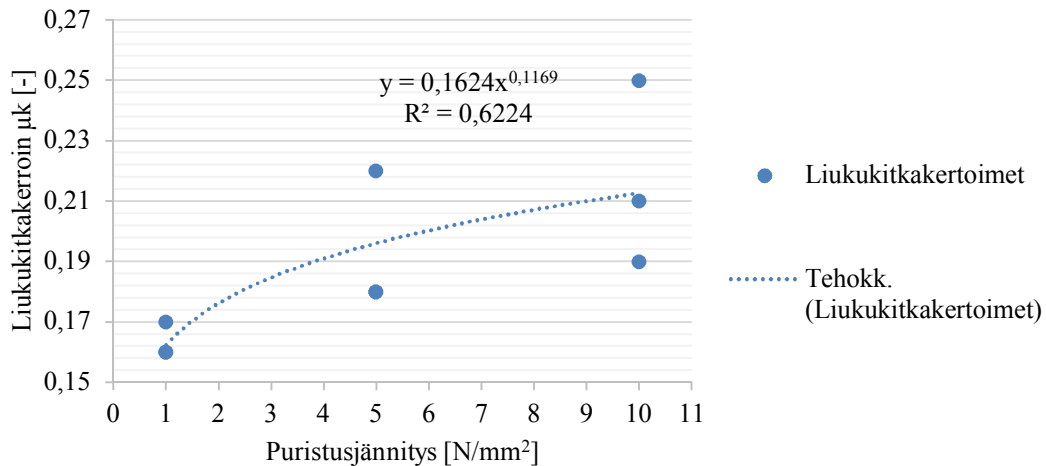
LVL-koepalojen pääkantosuunnan syiden ollessa kitkapintojen kanssa samansuuntaiset, kitkakertoimien arvoista havaittiin, että maksimiliukukitkakertoimien trendiviiva noudatti voimakkaaimmin laskevaa eksponenttifunktiota puristusjännityksen kasvaessa (Kuva 47). Liukukitkakertoimien trendiviiva noudatti nousevaa potenssifunktiota, kun puristusjännitys kasvoi (Kuva 48). Toisin sanoen, erotus maksimiliukukitka- ja liukukitkavoiman välillä oli pienempi suuremmilla jännityksillä kuin pienemmillä jännityksillä. Liukukitkakertoimien hajonta nousi puristusjännityksen kasvun yhteydessä, mistä johtuen variaatiokertoimien arvot nousivat (Kuva 49). Maksimiliukukitkakertoimen variaatiokertoimet nousivat ~1 N/mm² puristuksesta ~5 N/mm² puristukseen, mutta laski hieman ~10 N/mm² puristuksella.

2.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet



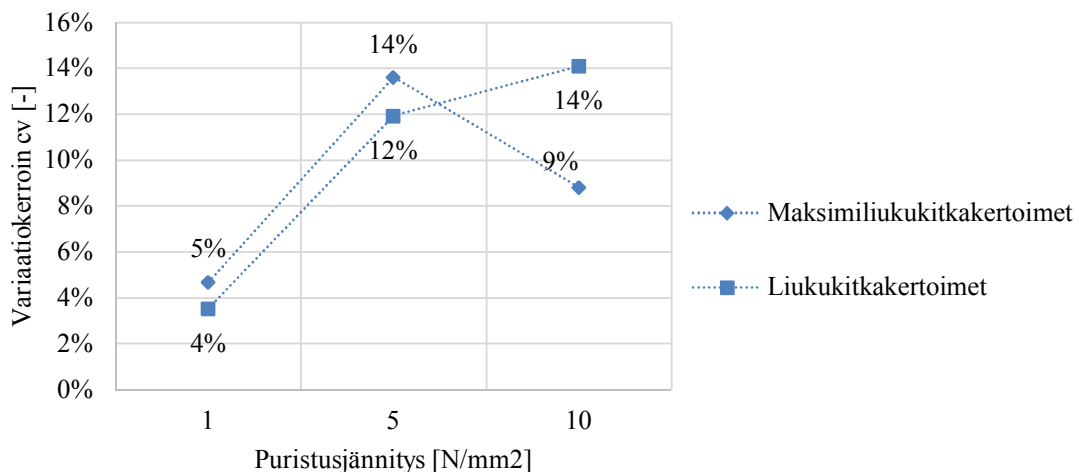
Kuva 47. 2.LVL-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selityssaste.

2.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet



Kuva 48. 2.LVL-LVL-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressiomallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

2.LVL-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



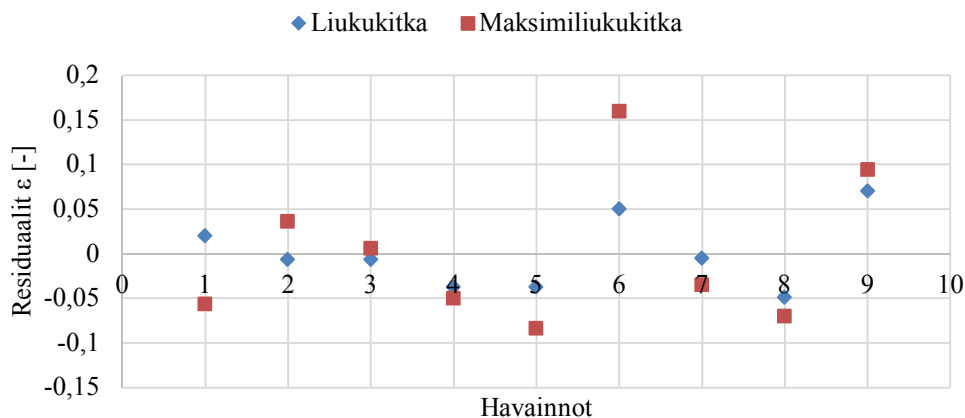
Kuva 49. 2.LVL-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

Kitkakertoimien regressiomallit olivat erilaiset funktioiden muotojen ja suuntien lisäksi mallien selittävyys ja merkitsevyyden suhteen (Taulukko 10). Maksimiliukukitkakertoimen regressiomalli selittää vain noin 18% kitkakertoimien arvojen muutoksista puristusjännityksen kasvaessa. Mallilla ei ole tilastollista merkitsevyyttä, koska p-arvo on suurempi kuin 0,05. Sitä vastoin liukukitkakertoimen nousevan potenssifunktion malli selittää yli 60% kitkakertoimien arvojen vaihteluista puristusjännityksen suhteen hyvin luotettavasti p-arvon ollessa alle 0,05. Samaa molemmissa malleissa on se, että residuaalien arvot nousevat, kun puristusjännitys nousee (Kuva 50). Voidaan todeta, että mallit selittävät paremmin kitkakertoimien vaihtelua, kun puristusjännityksen ovat pienemmät. Mittaustulosten ja regressiomallien perusteella materiaaliparilla 2. liukukitkan suuruus kasvaa jossakin määrin rajapintojen välisen puristusjännitysten kasvaessa. Maksimiliukukitkakertoimen ja puristusjännityksen välillä ei havaita olevan verrannollisuutta.

Taulukko 10. 2.LVL-LVL-parin regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	17,6	0,2614
Liukukitkakertoimen malli	62,2	0,0115

2.LVL-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



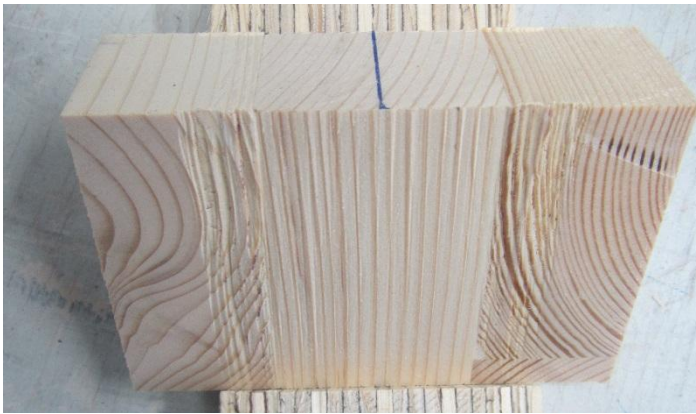
Kuva 50. 2.LVL-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

5.4.3 CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan

Materiaalikoeparin 3. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 11:ssä ja liukukitkakertoimet Taulukko 12:ssä variaatiokertoimineen. 3.CTL-LVL-koeparilla suoritettiin yhteensä kahdeksan onnistunutta koestusta vaaditun yhdeksän sijaan. Koestus 3.CL-10-1 ei onnistunut, sillä keskimmäinen CLT-kappale murtui sitä työnnettäessä CLT-lamellikerosten rajapinnoista ennen kuin kappale lähti liikkeelle (Kuva 51). Kappaleen murtovoima oli 26,6 kN. Taulukoista nähdään, että maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimien arvojen välinen ero on paljon suurempi $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristuksella kuin $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ ja $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksilla. Selkeää stick-slip-liikettä esiintyi kaikissa koestuksissa pois lukien toisessa $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen koestuksessa. Kun puristusjännitystä nostettiin, lujemmat LVL-koekappaleet painuivat enemmän pehmeämpään CLT-keskikappaleeseen. LVL-koekappaleet painuivat selkeämmin CLT-kappaleiden ulkolamelleihin (Kuva 52).



Kuva 51. Keskimäinen CLT-koekappale koestuksen 3.CL-10-1 jälkeen. Kappale murtui lamellien rajapinnoista.



Kuva 52. Keskimäinen CLT-koekappale koestuksen 3.CL-10-2 jälkeen. Lujemmat LVL-kappaleet ovat painuneet pehmeämpään CLT-kappaleeseen.

Taulukko 11. 3.CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~10 N/mm ²)
Maksimiliukukitkakertoimet	0,44	0,40	0,34
$\mu_{k,max}$ (-)	0,34	0,32	0,32
	0,45	0,32	-
Maksimiliukukitkakertoimien $\mu_{k,max}$ variaatiokerroin c_v (%)	15	14	5

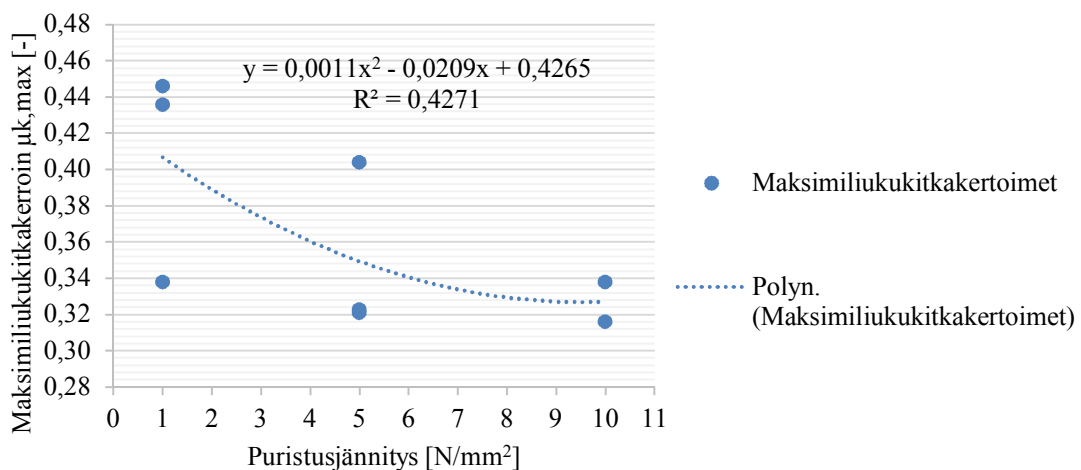
Taulukko 12. 3.CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~10 N/mm ²)
Liukukitkakertoimet μ_k (-)	0,18	0,25	0,3

	0,24	0,24	0,27
	0,22	0,25	-
Liukukitkakertoimien μ_k variaatiokerroin c_v (%)	14	2	7

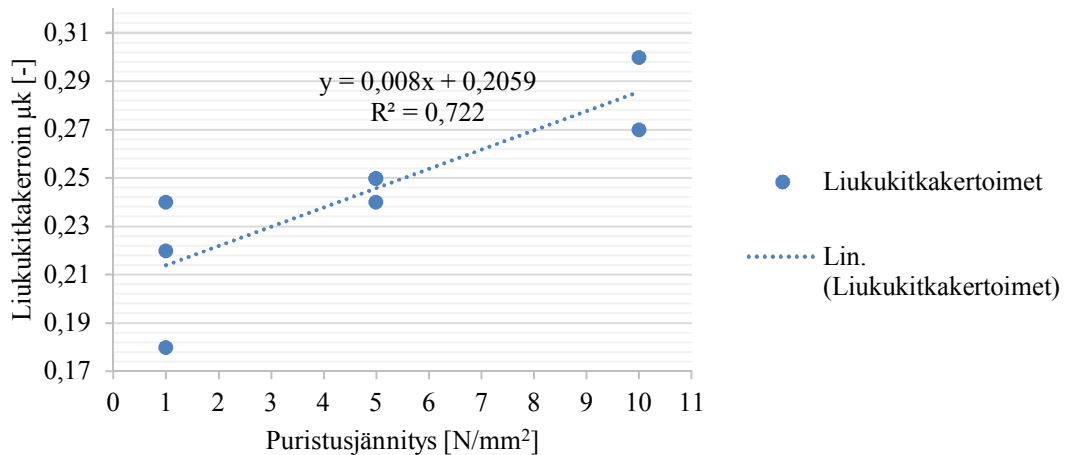
LVL-koepalojen pääkantosuunnan syiden ollessa kohtisuoraan CLT-pintaa vasten, kitkakertoimien arvoista havaittiin, että maksimiliukukitkakertoimien trendiviiva noudatti voimakaimmin laskevaa toisen asteen polynomifunktiota puristusjännityksen kasvaessa (Kuva 53). Liukukitkakertoimien trendiviiva nousi lineaarisesti puristusjännityksen kasvaessa (Kuva 54). Kuten LVL-LVL-materiaaliparilla 2., erotus maksimiliukukitka- ja liukukitkavoiman välillä oli pienempi suuremmilla jännityksillä kuin pienemmillä jännityksillä. Maksimiliukukitkakertoimen variaatiokerroin pysyi lähes samalla tasolla ~ 1 ja ~ 5 N/mm² puristusjännityksillä, jonka jälkeen kitkakertoimien variaatio oli todella pientä ~ 10 N/mm² puristuksella (Kuva 55). Liukukitkakertoimien variaatiokerroin laski merkityksellisesti ~ 1 ja ~ 5 N/mm² välillä, mutta nousi hieman ~ 10 N/mm² puristuksella.

3. CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet



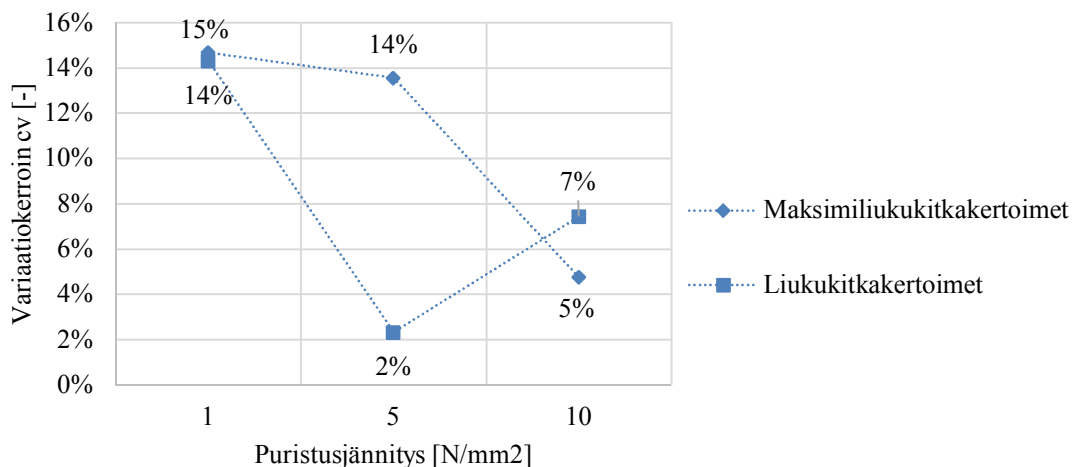
Kuva 53. 3. CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

3.CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet



Kuva 54. 3.CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressiomallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

3.CLT-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



Kuva 55. 3.CLT-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

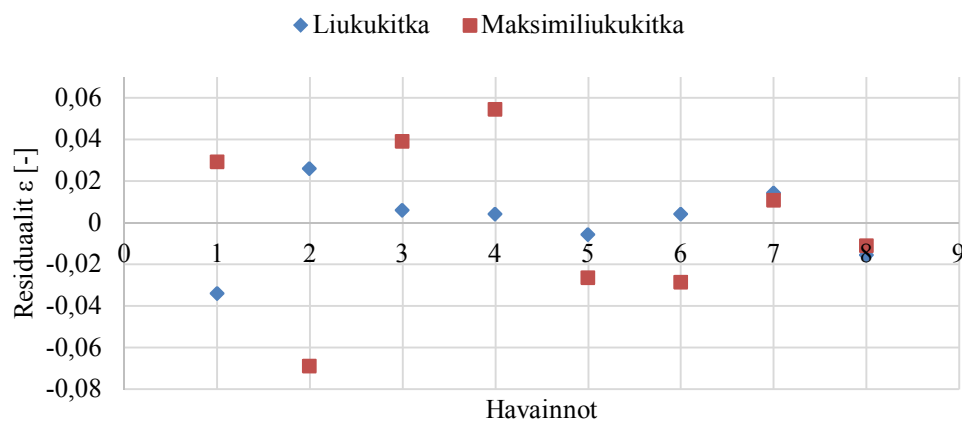
3.CLT-LVL-materiaaliparin maksimiliukukitka- ja liukukitkan regressiomallien selitysasheet ja p-arvot eroavat toisistaan (Taulukko 13). Maksimiliukukitkakertoimien vaihtuvuus puristusjännityksen noustessa voidaan selittää noin 43% osalta mittaustuloksista. Maksimiliukukitkakertoimen regressiomallilla ei ole tilastollisesti merkittävä, sillä p-arvo on suurempi kuin satunnaisvirheen raja 0,05. Liukukitkakertoimen malli selittää paljon paremmin kitkan käyttäytymisen puristusjännityksen suhteen kuin maksimiliukukitkakertoimen malli. 72% liukukitkakertoimien arvoista voidaan selittää kasvavan lineaarisesti, kun puristusjännitystä lisätään. Liukukitkakertoimen lineaarista regressiomallia voidaan pitää hyvin luotettavana, koska p-arvo on jopa alle 0,01. Molemmassa malleissa residuaalien arvot ovat pienemmät suuremmilla puristusjännityksillä (Kuva 56). Residuaalien perusteella mallit, erityisesti liukukitkakertoimen malli, selittävät kitkakertoimien arvojen riippuvuuden kappaleiden välisestä puristusjännityksestä paremmin suurilla jännityksillä. Liukukitkan mallin residuaalit ovat pienet ja jakautuneet diagrammille suhteellisen tasaisesti, mikä tukee lineaarisen

regressiomallin paikkansapitävyyttä. Maksimiliukukitkakitkan mallin residuaalit ovat pääsääntöisesti suuremmat kuin liukukitkan mallin, ja ne ovat jakautuneet heteroskedastisesti diagrammille. Mittaustulosten ja regressiomallien perusteella materiaaliparilla 3. liukukitkan suuruuden voidaan luotettavasti todeta kasvavan enimmäkseen lineaarisesti, kun puristusjännitystä lisätään. Maksimiliukukitkakertoimen ja puristusjännityksen välillä ei ole verrannollisuutta näillä mittaustuloksissa ja regressiomallilla.

Taulukko 13. 3.CLT-LVL-parin regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	42,7	0,2485
Liukukitkakertoimen malli	72,2	0,0076

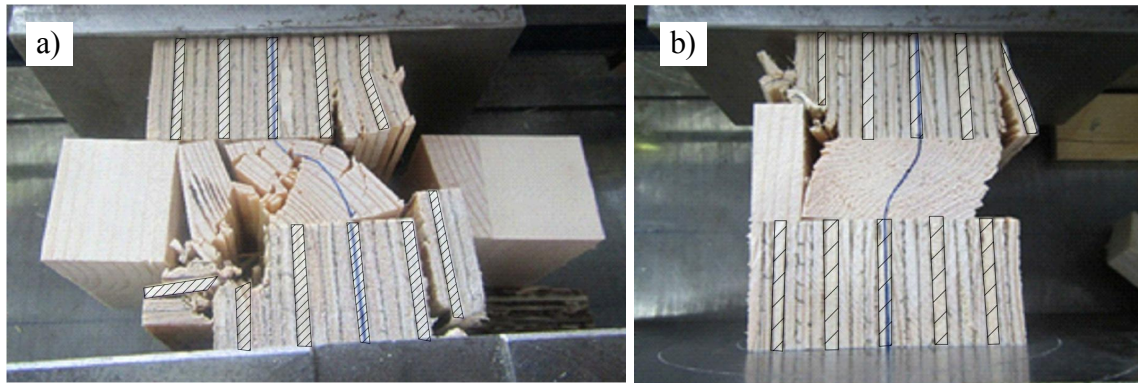
3.CLT-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



Kuva 56. 3.CLT-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

5.4.4 CLT-LVL, LVL:n pääkantosuunnan syyt samansuuntaisesti kitkapintojen kanssa

4.CLT-LVL-koeparilla suoritettiin yhteensä kuusi onnistunutta koestusta vaaditun yhdeksän sijaan. Kaikissa kolmessa $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen koestuksessa vähintään keskimäinen CLT-kappale ja toinen ulommista LVL-kappaleista murtuivat puristusjännityksestä ennen kuin keskimäistä kappaletta alettiin työntää alaspäin (Kuva 57 a)). Koska kaikki $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen koekappaleet murtuivat ennen itse koestusta, $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristukset haluttiin koestaa myös tilanteessa, missä keskimäinen CLT-kappale oli yhtä leveä kuin ulommat LVL-kappaleet. 100 mm leveistä CLT-palojen molemmista ulkolamelleista sahattiin materiaalia pois noin 18,5 mm, jotta CLT-kappale olisi 63 mm leveä. Tällä menettelyllä haluttiin varmistaa se, että onko erikokoisilla koekappaleilla vaikutusta koekappaleiden puristumurtoon. Kitkapinta-alat olivat yhtä suuret ja samankaltaiset molemmilla CLT-kappaleiden leveyksillä. Tosin myös kaikki kapeampien CLT-keskikappaleiden koestusten koekappaleet murtuivat samalla tavalla $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksesta ennen kitkan koestamista (Kuva 57 b)).



Kuva 57. $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristus mursi 4. CLT-LVL-materiaaliparin koekappaleet sekä leveämmällä (a) että kapeammalla (b) CLT-keskikappaleella. Rasteroitujen viilujen syyt ovat koh-tisuoraan kontaktipintoja vastaan.

Materiaalikoeparin 4. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 14:ssa ja liukukitkakertoimet Taulukko 15:ssa variaatiokerroimien. Maksimiliukukitkakertoimet jakautuivat $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ ja $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksillä omiin ryhmiinsä arvojen ollessa $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristuksella välillä 0,35-0,45 ja $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristuksella välillä 0,26-0,34. Liukukitkakertoimet jakautuivat paljon epätasaisemmin. Pienemmällä puristuksella kertoimien hajonta oli pientä arvojen ollessa välillä 0,20-0,22. Suuremmalla $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristuksella hajonta oli huomattavasti suurempaa kertoimien asettuessa välille 0,17-0,23. Selkeää stick-slip-liikettä esiintyi vain hieman koestuksen 4.CL-5-1 liukukitka-alueella.

Taulukko 14. 4. CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys ($\sim 1 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 5 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 10 \text{ N/mm}^2$)
Maksimiliukukitkakertoimet	0,45	0,34	-
$\mu_{k,\max} (-)$	0,38	0,27	-
	0,35	0,26	-
Maksimiliukukitkakertoimien $\mu_{k,\max}$ variaatiokerroin $c_v (%)$	13	15	-

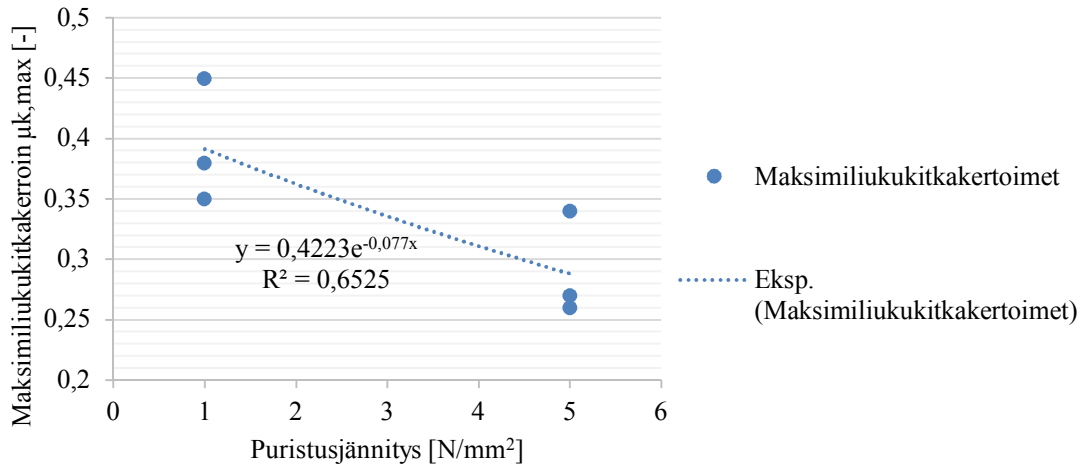
Taulukko 15. 4. CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys ($\sim 1 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 5 \text{ N/mm}^2$)	Puristusjännitys ($\sim 10 \text{ N/mm}^2$)
Liukukitkakertoimet $\mu_k (-)$	0,22	0,21	-
	0,22	0,17	-
	0,20	0,23	-
Liukukitkakertoimien μ_k variaatiokerroin $c_v (%)$	5	15	-

LVL-koepalojen pääkantosuunnan syiden ollessa CLT-kappaleiden pintojen kanssa samansuuntaiset, maksimiliukukitkakertoimien trendiviiva noudatti voimakkaimmin laskevaa eks-

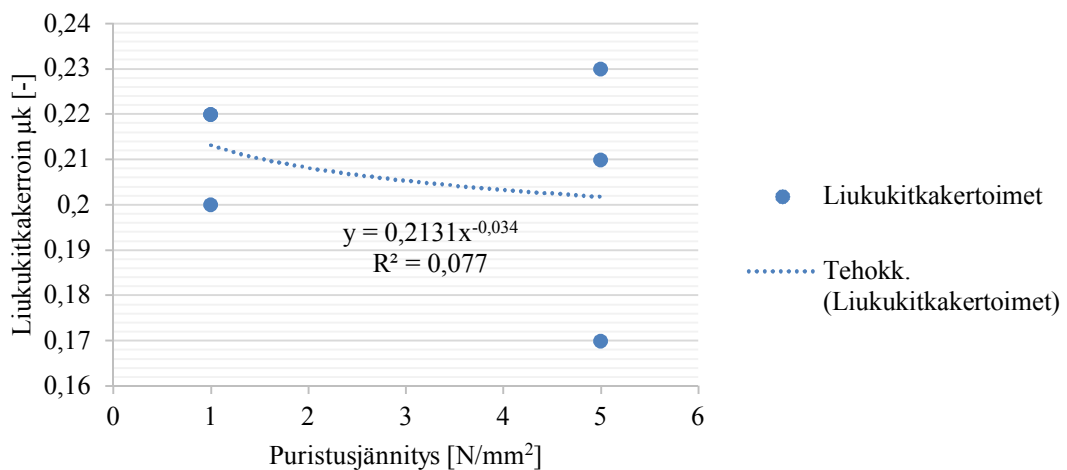
ponenttifunktiota puristusjännityksen kasvaessa (Kuva 58). Liukukitkakertoimien trendiviiva noudatti laskevaa potenssifunktiota, kun puristusjännitys kasvoi (Kuva 59). Maksimiliukukitkakertoimien variaatiokertoimien arvot nousivat hieman (Kuva 60). Liukukitkakertoimien hajonta oli huomattavasti suurempaa $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksellä, siitä syystä variaatiokertoimen arvo kasvoi 10%-yksikköä.

4.CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet



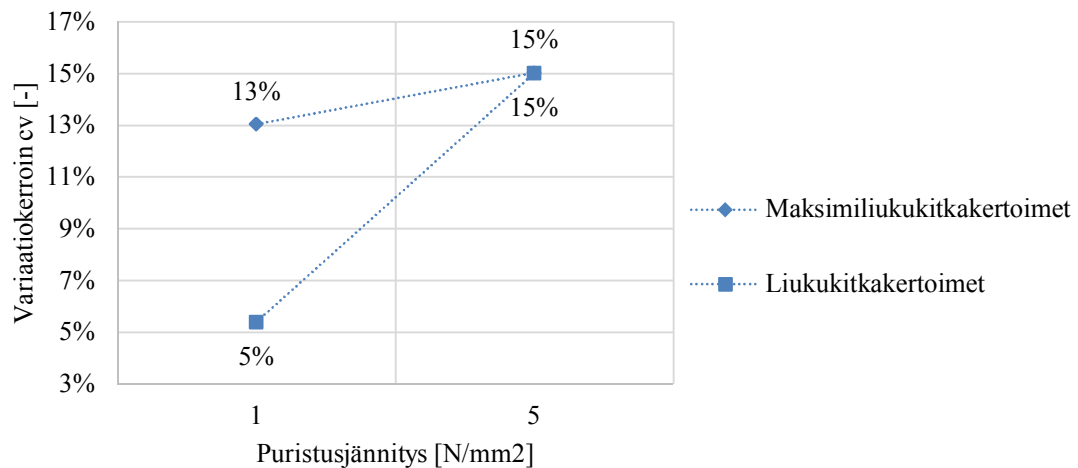
Kuva 58. 4.CLT-LVL-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

4.CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet



Kuva 59. 4.CLT-LVL-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

4.CLT-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



Kuva 60. 4.CLT-LVL-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

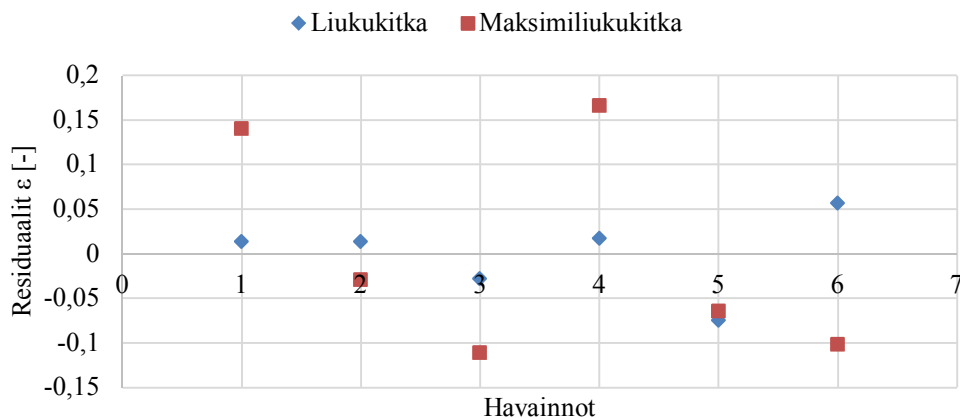
4.CLT-LVL-materiaaliparin maksimiliukukitka- ja liukukitkan regressiomallien selityssasteet ja p-arvot eroavat hyvin paljon toisistaan (Taulukko 16). Maksimiliukukitkakertoimien regressiomalli selittää noin 65% havaituista kitkakertoimista. Maksimiliukukitkakertoimen regressiomallia ei voida pitää tilastollisesti merkitsevänä suhteellisen korkeasta selityssasteesta huolimatta, sillä mallin p-arvo ylittää hieman satunnaisvirheen rajan 0,05. Liukukitkakertoimien suuren hajonnan vuoksi, potenssifunktion muotoinen malli ei selitä juuri yhtään liukukitkakertoimien vaihtelua puristusjännityksen suhteen. Erittäin suuri p-arvo ei tue mallin tilastollista merkitsevyyttä, eikä näin sen hyödynnettävyyttä. Tosin $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen mittaustulosten puuttuminen antaa suppean kuvan sekä maksimiliukukitka- että liukukitkan käyttäytymisestä 4.CLT-LVL-materiaaliparilla. Vain kuudella havainnolla tehdyt mallit ovat herkkiä suhteellisen suuriin ja pieniin mittaustuloksiin. Esimerkiksi pelkästään poistamalla $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ liukukitkakertoimien suurimman arvon 0,23, mallin selityssaste nousisi noin 30%. Vaikka arvo 0,23 poistettaisiin, liukukitkan mallin selityssaste ei olisi vielääkään korkea. Tämä kuitenkin korostaa sitä, miten herkkiä mallit ovat suhteessa suurille ja pienille tuloksille.

Residuaalidiagrammin perusteella maksimiliukukitkakertoimen malli vaikuttaa hyvältä, sillä residuaalit asettuvat diagrammiin suhteellisen tasaisesti (Kuva 61). Vaikka maksimiliukukitkakertoimen regressiomallin p-arvo ylittää tilastollisen merkitsevyyden rajan, voidaan mallia pitää jokseenkin oikean suuntaisena. Liukukitkakertoimen mallin residuaalit ovat asettuneet diagrammille heteroskedastisesti pienemmän puristusjännityksen päähän. $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristuksen liukukitkakertoimien havainnot selittyvät paremmin regressiomallin avulla kuin $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristuksen tulokset. Mittaustulosten ja regressiomallien perusteella materiaaliparilla 4. maksimiliukukitkan suuruuden voidaan todeta laskevan jossakin määrin eksponentiaalisesti puristusjännityksen viisinkertaistuessa. Liukukitkakertoimen ja puristusjännityksen välillä ei ole verrannollisuutta näillä mittaustuloksissa ja regressiomallilla.

Taulukko 16. 4.CLT-LVL-parin regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	65,3	0,0519
Liukukitkakertoimen malli	7,7	0,5946

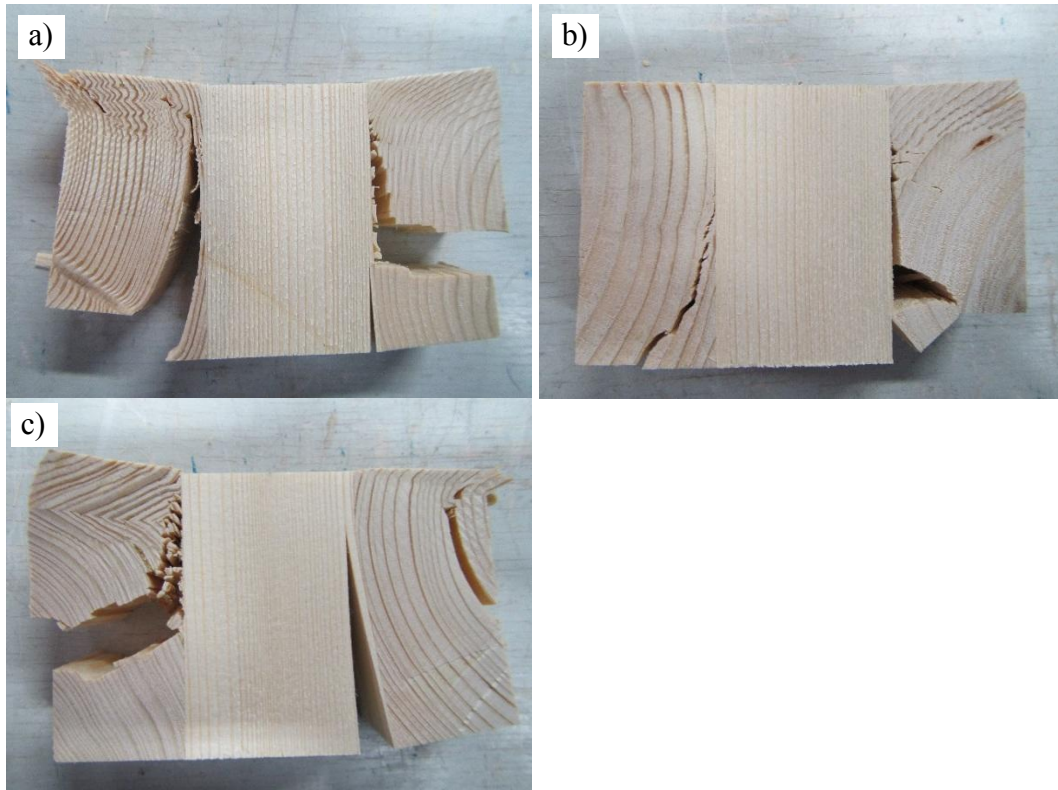
4.CLT-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



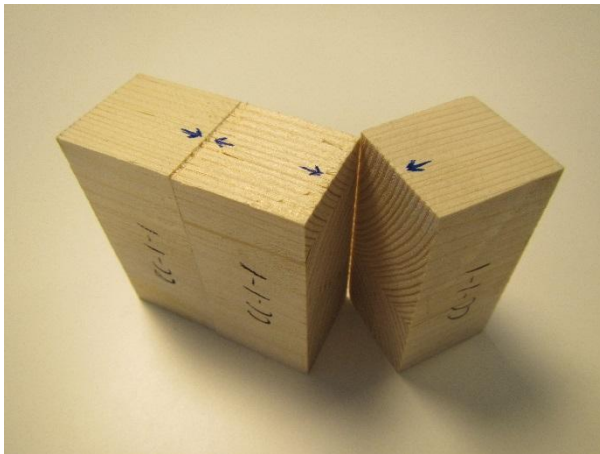
Kuva 61. 4.CLT-LVL-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

5.4.5 CLT-CLT, pääkantosuunnan syyt kohtisuoraan kitkapintoja vastaan

Materiaalikoeparin 5. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 17:ssä ja liukukitkakertoimet Taulukko 18:ssä variaatiokertoimineen. 5.CLT-CLT-koeparilla suoritettiin yhteensä vain kolme onnistunutta koetusta vaaditun yhdeksän sijaan. Koestukset puristusjännityksillä ~ 5 ja ~ 10 N/mm² eivät onnistuneet, sillä keskimmäiset CLT-kappaleet murtuivat niitä työnnettäessä CLT-lamellikerrosten rajapinnoista ennen kuin kappaleet lähtivät liikkeelle. Murtumismekanismeja oli kolmea erilaista (Kuva 62). Kaikkien kuuden koestuksen murtovoimat olivat välillä 20,8-27,0 kN. Pitkäaikaiskokeita ei voitu tästä syystä suorittaa koekappaleparille 5.CLT-CLT ~ 5 ja ~ 10 N/mm² puristusjännityksillä materiaalin murtumisten vuoksi. ~ 1 N/mm² puristuksen koestuksissa ilmeni selkeää, mutta pientä stick-slip-liikettä. Koska murtokohta tapahtui ulko- ja sisälamellin rajapinnasta, ja ulkolamellit ottavat mitoitustilanteessa seinärakenteeseen kohdistuvat pystykuormat, testattiin pelkästään ulkolamellien syiden välistä kitkapintaa (Kuva 63). Oletettavaa on, että työntävän voiman pitää syrjäyttää karheampien ulkolamellien pintojen liikettä vastustava voima. CLT:stä sahattiin koepalat sisä- ja ulkolamellin rajapinnasta niin, että yhden koekappaleen koko oli 30x30x65 (korkeus x leveys x pituus).



Kuva 62. Koestuksen 5.CC-10-3 keskikappale a), jonka vasen ulkolamelli on murtunut tangentin suuntaisesti, 5.CC-5-1 keskikappale b), jonka oikea ulkolamelli on murtunut suoraan rajapinnan suuntaisesti ja 5.CC-5-2 keskikappale c), jonka keskilamelli on murtunut syiden suunnassa oikeasta reunasta.



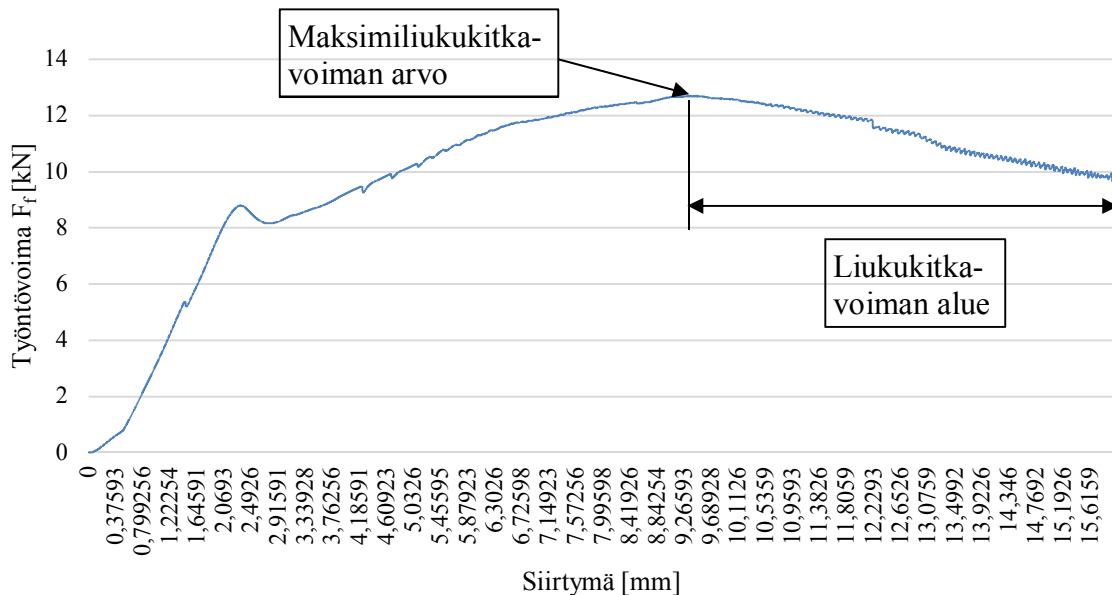
Kuva 63. Pienet CLT:n ulkolamellikoekappaleet, jotka on sahattu CLT:n sisä- ja ulkolamellien rajapinnoista

Pienten CLT-koekappaleiden koestusten puristusjännitykset olivat samat kuin muilla koestuksilla. Kappaleisiin vaikuttavat normaalivoimat olivat 2,0; 10,0 ja 20,0 kN suuruisia. Pienten koekappaleiden kontaktipinta-ala oli 1950 mm². Pienten CLT-kappaleiden maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimet saatiin määritettyä ~1 ja ~5 N/mm² puristuksilla variaatiokertoimineen (Taulukko 17). ~10 N/mm² puristuksella kahdelle koestukselle ei voitu määrittää kitkakertoimia, koska keskikappaleet painuivat kasaan työntävästä voimasta niiden pysyessä paikallaan (Kuva 64). Pienten CLT-kappaleiden koestuksen 5.CC-10-2 keskikappale lähti liikkeelle painuen hieman kasaan, mutta vasta noin 9,37 mm työntökoneen

männän siirtymän jälkeen (Kuva 65). Koska kappale lähti liikkeelle ja sen jälkeen havaittiin stick-slip-ilmiötä, voitiin koestukselle määrittää maksimiliukukitkakerroin. Liukukitkavoima vaikutti tässä koestuksessa vain hieman yli 6 mm siirtymällä, ja liukukitkavoiman suuruus laski koestuksen loppuun asti. Koska liukukitkavoiman osuus oli huomattavan pieni koestuksella 5.CC-10-2, ei tämän koestuksen liukukitkakerrointa voida määrittää riittävällä varmuudella, sillä sen arvo saattaisi olla liian suuri todelliseen arvoon nähden. ~ 1 ja ~ 5 N/mm² puristuksen koestuksissa ilmeni selkeää ja suurta stick-slipiä liukukitkan alueella.



Kuva 64. Pienten CLT-koekappaleiden koestus ~ 10 N/mm² puristuksella. Kappaleiden kitkaa vastustava voima oli suurempi kuin ulkoinen työntävä voima, mistä johtuen keskikappale painui kasaan.



Kuva 65. Pienen 5.CC-10-2-koestuksen siirtymä ulkoisen työntövoiman funktiona. Liukukitkaa ei voitu määrittää liukukitkavoiman pienen alueen vuoksi.

Taulukko 17. 5.CLT-CLT-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristus- jännitys (~1 N/mm ²)	Puristus- jänni- tys/pieni (~1 N/mm ²)	Puristus- jännitys (~5 N/mm ²)	Puristus- jännitys/ pieni (~5 N/mm ²)	Puristus- jännitys (~10 N/mm ²)	Puristus- jännitys/ pieni (~10 N/mm ²)
Maksimiliuku- kitkakertoimet	0,39	0,36	-	0,36	-	0,32
$\mu_{k,max}$ (-)	0,46	0,45	-	0,37	-	-
	0,35	0,49	-	0,35	-	-
Maksimiliuku- kitkakertoimien $\mu_{k,max}$ variaatio- kerroin c_v (%)	14	15	-	2	-	-
Pitkäaikais- koestuksen maksimiliuku- kitkakerroin $\mu_{k,max,14vrk}$ (-)	0,29	-	-	-	-	-

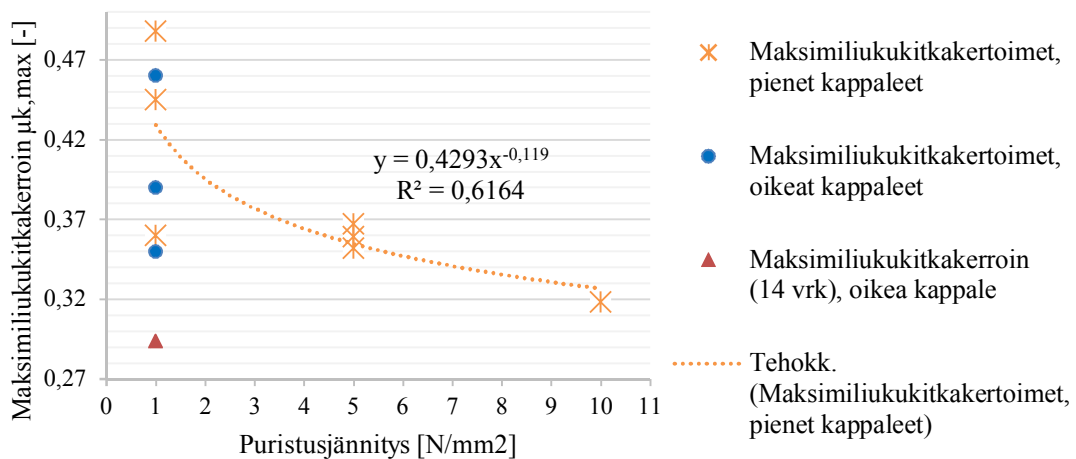
Taulukko 18. 5.CLT-CLT-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristus- jännitys (~1 N/mm ²)	Puristus- jännitys/ pieni (~1 N/mm ²)	Puristus- jännitys (~5 N/mm ²)	Puristus- jännitys/ pieni (~5 N/mm ²)	Puristus- jännitys (~10 N/mm ²)	Puristus- jännitys/ pieni (~10 N/mm ²)
Liukukitkaker- toimet μ_k (-)	0,28	0,23	-	0,24	-	-
	0,27	0,30	-	0,16	-	-
	0,23	0,26	-	0,23	-	-
Liukukitkaker- toimien μ_k vari- aatiokerroin c_v (%)	10	13	-	21	-	-
Pitkäaikais- koestuksen liu- kukitkakerroin $\mu_{k,14vrk}$ (-)	0,25	-	-	-	-	-

Oikeiden CLT-koekappaleiden koestusten jäädessä vain ~1 N/mm² puristusjännityksen arvoihin, kitkakertoimien regressioanalyysi tehtiin pienten CLT-koekappaleiden arvoille. Pienten CLT-kappaleiden maksimiliukukitkakertoimien havaittiin noudattavan voimakaimmin laskevan potenssifunktion muotoa puristusjännityksen noustessa (Kuva 66). Liukukitkakertoimet laskivat vahvimmin lineaarisesti ~1 N/mm² puristuksen arvoista ~5 N/mm² arvoihin (Kuva 67). 14 vuorokautta kestäneen ~1 N/mm² puristusjännityksen pitkäaikaiskoestuksen jälkeen oikeiden CLT-koekappaleiden välisten pintojen maksimiliukukitkakertoimen arvo oli 0,06 yksikköä pienempi kuin pienin lyhytaikaiskoestuksen kitkakertoimen

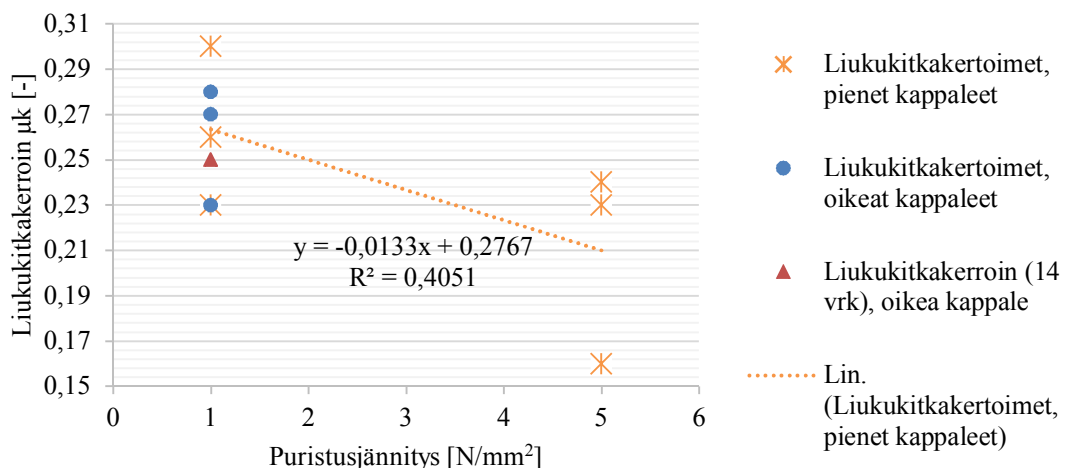
arvo saman kokoisilla koekappaleilla ja samalla puristusjännityksellä. Pitkäaikaiskoestuksen liukukitkakerroin sijoittui oikeiden koekappaleiden liukukitkakertoimien arvojen välille. Pienten koekappaleiden kitkakertoimien arvot olivat samaa suuruusluokkaa $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristuksella kuin oikeiden kappaleiden kitkakertoimet. Pienten koekappaleiden variaatiokertoimet käyttäytyivät eri tavoin (Kuva 68). Maksimiliukukitkakertoimien variaatiokertoimet laskivat, ja liukukitkakertoimien variaatiokertoimet päinvastoin nousivat. Oikeiden koekappaleiden kitkakertoimien variaatiokertoimet $\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksellä olivat samansuuruiset kuin pienten koekappaleiden variaatiokertoimet saman puristuksen alaisuudessa.

5.CLT-CLT-parin maksimiliukukitkakertoimet



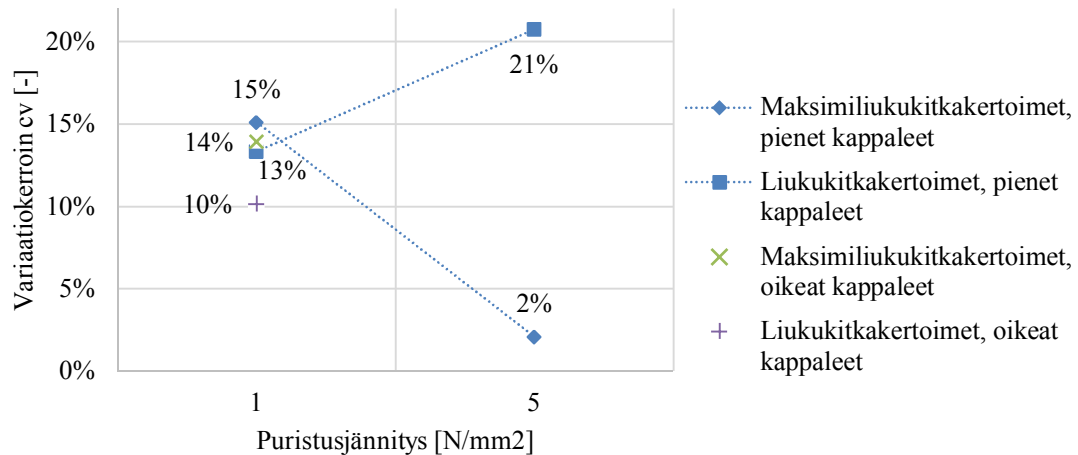
Kuva 66. 5.CLT-CLT-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä pienten kappaleiden regressiomallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

5.CLT-CLT-parin liukukitkakertoimet



Kuva 67. 5.CLT-CLT-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä pienten kappaleiden regressiomallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

5.CLT-CLT-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



Kuva 68. 5.CLT-CLT-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

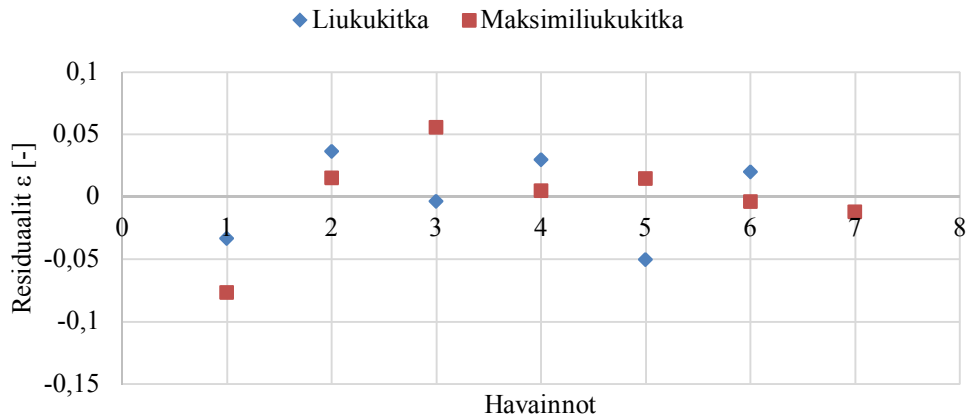
5.CLT-CLT-materiaaliparin pienten koekappaleiden maksimiliukukitka- ja liukukitkan regressiomallien selitysasteet ja p-arvot eroavat toisistaan (Taulukko 19). Maksimiliukukitkakertoimien regressiomalli selittää noin 62% havaituista kitkakertoimista. Mallia voidaan pitää p-arvon perusteella tilastollisesti merkittävänä p-arvon ollessa noin 0,04. Liukukitkakertoimella ei voida todeta olevan verrannollisuutta puristusjännityksen suhteen regressiomallin selitysasteen ollessa suhteellisen matala ja p-arvon ollessa korkea. Kuten materiaaliparilla 4.CLT-LVL, $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen mittaustulosten puuttuminen molemmista regressiomalleista ei anna todellista kuvaa, miten maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimet muuttuvat puristusjännityksen kasvaessa.

Maksimiliukukitkakertoimien regressiomallin residuaalit asettuvat residuaalidiagrammille heteroskedastisesti (Kuva 69). Maksimiliukukitkakertoimen malli selittää residuaalien perusteella kitkakertoimen arvojen muutokset paremmin ~ 5 ja $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksillä. Liukukitkakertoimen mallin residuaalit ovat asettuneet diagrammille tasaisesti. Residuaalien tasaisen jakauman mukaan lineaarinen malli olisi oikein täsmennetty, vaikka mallin selitysaste on matala ja p-arvo korkea. Residuaalien ollessa tasaisesti, ne jäävät kuitenkin kauaksi sovitesuorasta, mikä johtaa edellä mainittuihin liukukitkan mallin epäsuotuiseseen selitysasteeseen ja p-arvoon. Mittaustulosten ja regressiomallien perusteella materiaaliparin 5. pienillä koekappaleilla maksimiliukukitkan suuruuden voidaan todeta laskevan potenssi-funktion mukaisesti puristusjännityksen kasvaessa. Liukukitkakertoimen ja puristusjännityksen välillä ei ole verrannollisuutta näillä mittaustuloksissa ja regressiomallilla.

Taulukko 19. 5.CLT-CLT-parin pienten koekappaleiden regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	61,4	0,0365
Liukukitkakertoimen malli	40,5	0,1742

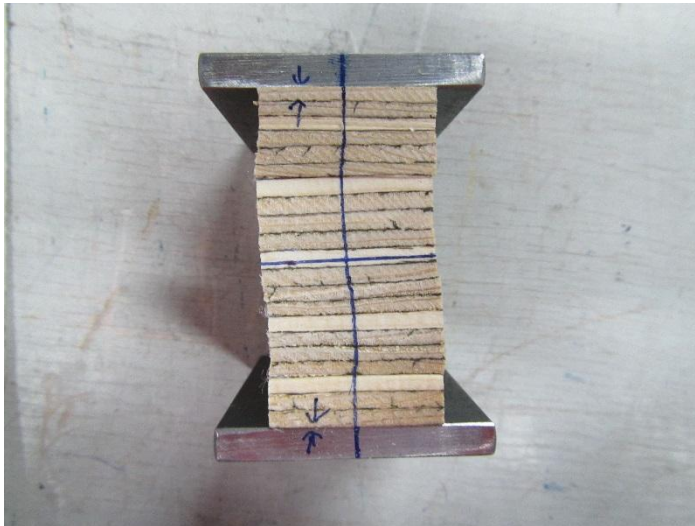
5.CLT-CLT-parin pienten koepalojen kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



Kuva 69. 5.CLT-CLT-parin pienten koepalojen kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

5.4.6 LVL-teräs, LVL:n lapepinnat teräspintaa vastaan

Materiaalikoeparin 6. mitatut maksimiliukukitkakertoimet on esitetty Taulukko 20:ssä ja liukukitkakertoimet Taulukko 21:ssä variaatiokertoimineen. Vain yhdessä $\sim 5 \text{ N/mm}^2$ puristusjännityksen koestuksessa esiintyi selkeä stick-slip-liikettä liukukitkavoiman alueella. Kaikissa muussa kahdeksassa koestuksessa kitkavoimien vaihtelu oli pientä. Koska suurin koestuksessa käytetty puristusjännitys $\sim 9 \text{ N/mm}^2$ oli LVL:n ominaispuristuslujuuden suuruinen, 6.LT-9 koestusten LVL-koekappaleiden paksuudet deformatuivat puristavasta normaalivoimasta noin 5 mm (Kuva 70). LVL-kappaleet eivät murtuneet $\sim 9 \text{ N/mm}^2$ puristuksesta.



Kuva 70. 6.LT-9-sarjan koestusten LVL-keskikappaleet deformatuivat.

Taulukko 20. 6.LVL-teräs-parin maksimiliukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

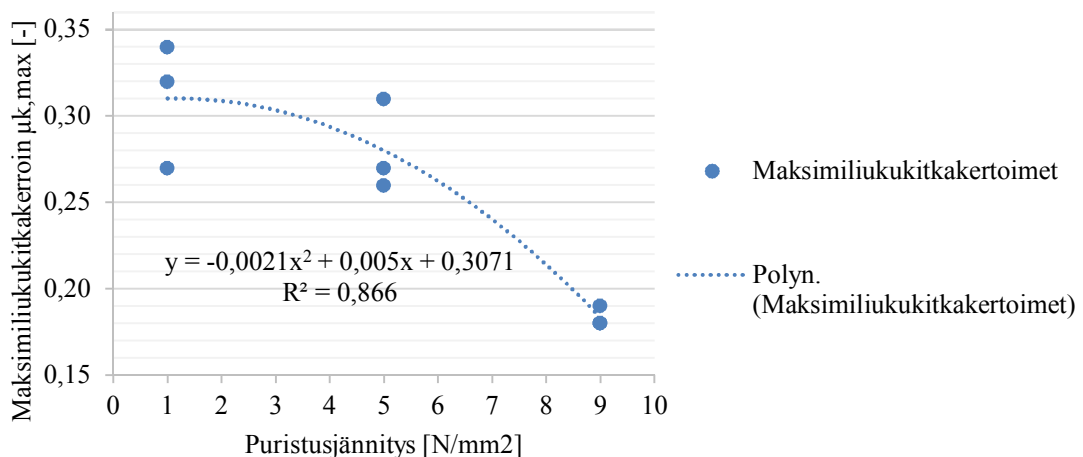
	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~9 N/mm ²)
Maksimiliukukitkakertoimet	0,27	0,26	0,19
$\mu_{k,max}$ (-)	0,34	0,31	0,18
	0,32	0,27	0,18
Maksimiliukukitkakertoimien $\mu_{k,max}$ variaatiokerroin c_v (%)	12	9	3

Taulukko 21. 6.LVL-teräs-parin liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä.

	Puristusjännitys (~1 N/mm ²)	Puristusjännitys (~5 N/mm ²)	Puristusjännitys (~9 N/mm ²)
	0,20	0,13	0,17
Liukukitkakertoimet μ_k (-)	0,31	0,23	0,17
	0,25	0,21	0,16
Liukukitkakertoimien μ_k variaatiokerroin c_v (%)	22	28	3

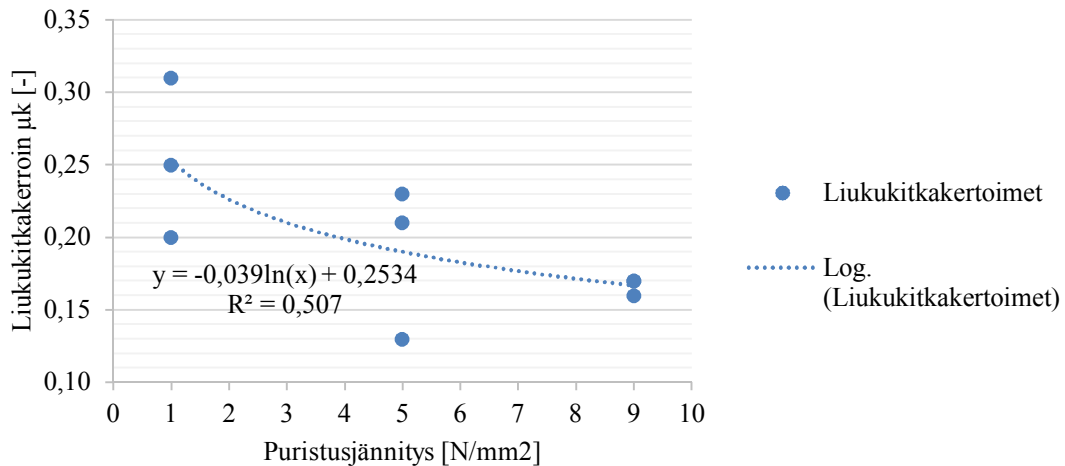
LVL-koepalojen lapepintojen ollessa teräspintaa vastaan, maksimiliukukitkakertoimien regressiomallin sovitefunktion havaittiin noudattavan parhaiten laskevaa toisen asteen polynomifunktiota (Kuva 71). Liukukitkakertoimien tulosten trendiviiva käyttäytyi parhaiten laskevan logaritmifunktion mukaisesti (Kuva 72). Maksimiliukukitkakertoimien variaatiokerroimet laskivat puristusjännityksen noustessa (Kuva 73). Liukukitkakertoimien variaatiokerroimien arvot olivat muiden materiaali-parien variaatiokerroimiin verrattuna suhteellisen suuria ~1 ja ~5 N/mm² puristusjännityksillä. ~9 N/mm² puristuksella sekä maksimiliukukitka- että liukukitkakertoimien variaatio oli verrattain todella pientä.

6.LVL-teräs-parin maksimiliukukitkakertoimet



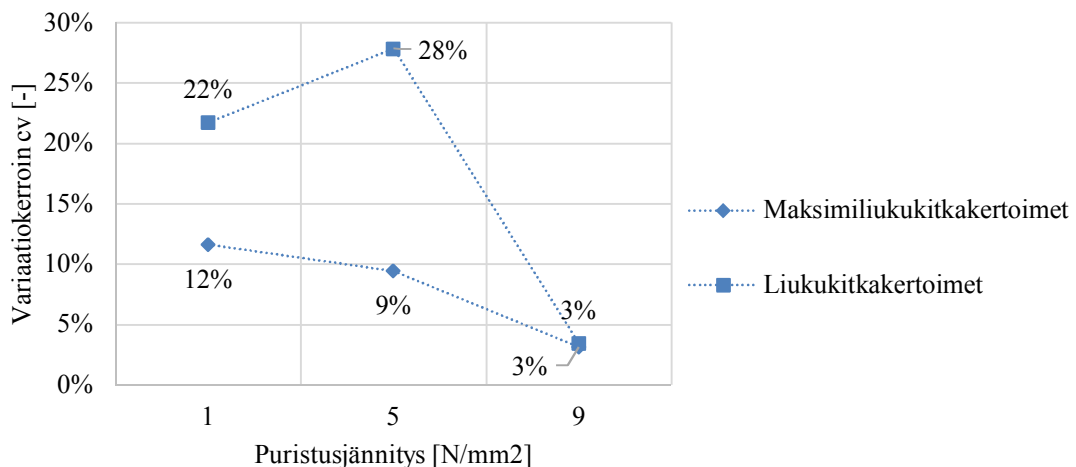
Kuva 71. 6.LVL-teräs-parin maksimiliukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressio-mallin trendiviiva ja mallin selityssaste.

6.LVL-teräs-parin liukukitkakertoimet



Kuva 72. 6.LVL-teräs-parin liukukitkakertoimet puristusjännityksen suhteen sekä regressiomallin trendiviiva ja mallin selitysaste.

6.LVL-teräs-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet



Kuva 73. 6.LVL-teräs-parin kitkakertoimien variaatiokertoimet.

LVL-teräs-parin kitkakertoimien regressiomallien tunnusluvut on esitetty Taulukko 22. Maksimiliukukitkakertoimen regressiomalli selittää selvästi suurimman osan kitkakertoimien arvojen muutoksista puristusjännityksen kasvaessa. Maksimiliukukitkakertoimen mallia voidaan pitää tilastollisesti merkitsevänä p-arvon ollessa vain 0,0024. Liukukitkakertoimen mallin selitysaste on huonompi kuin maksimiliukukitkakertoimen. Liukukitkakertoimien vaihtelusta puristusjännityksen suhteen voidaan selittää noin puolet regressiomallin avulla. Liukukitkakertoimen malli voidaan kuitenkin pitää tilastollisesti merkittävänä, sillä mallin p-arvo on alle 0,05.

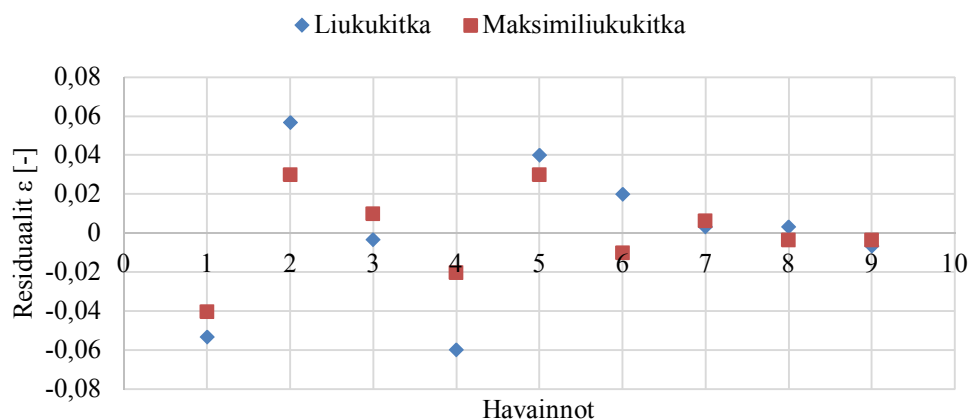
Sekä maksimiliukukitka- että liukukitkakertoimien regressiomallien residuaalidiagrammit ovat heteroskedastisia (Kuva 74). Residuaalidiagrammista nähdään, että molempien kitkakertoimien mallit selittyvät sitä paremmin mitä korkeammaksi puristusjännitys nousee. Eri-

tyisesti $\sim 9 \text{ N/mm}^2$ puristuksella molempien kitkakertoimien arvoissa on erittäin vähän hajontaa. Mittaustulosten ja regressiomallien perusteella materiaaliparilla 6. maksimiliukukitkan suuruuden voidaan todeta laskevan merkityksellisesti toisen asteen polynomifunktion mukaisesti, kun puristusjännitystä kasvatetaan. Liukukitkakertoimen voidaan todeta laskevan tilastollisesti merkityksellisesti logaritmifunktion mukaisesti puristusjännityksen noustessa.

Taulukko 22. 6.LVL-teräs-parin regressioanalyysin tunnusluvut.

	Selitysaste R^2 (%)	Mallin tilastollinen merkitsevyys, p-arvo (-)
Maksimiliukukitkakertoimen malli	86,6	0,0024
Liukukitkakertoimen malli	50,7	0,0314

6.LVL-teräs-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit



Kuva 74. 6.LVL-teräs-parin kitkakertoimien regressiomallien residuaalit.

6 Kokeellisten tulosten arviointi

Regressiomallien selitysasteiden ja tilastollisen merkittävyyksien perusteella kitkakertoimissa havaittiin selvää laskevaa trendiä puristusjännityksen kasvaessa materiaaliparien 4.CLT-LVL, 5.CLT-CLT (pienet koekappaleet) ja 6.LVL-teräs maksimiliukukitkakertoimissa ja 6.LVL-teräs liukukitkakertoimissa. Näiden lisäksi materiaaliparien 2.LVL-LVL ja 3.CLT-LVL maksimiliukukitkakertoimien ja 5.CLT-CLT liukukitkakertoimien kitkakerroin-puristusjännityskuvaajista voidaan nähdä, että kitkakertoimien arvot ovat laskussa, vaikka sovitefunktioiden selitysaste on alhainen. Yksi selvästi poikkeava havainto muista havainnoista saattaa vaikuttaa oleellisesti regressiomallin selitysasteeseen.

Edellisen kappaleen materiaaliparien kitkakertoimien havainnot tukevat luvussa 4.1.4 esitettyä teoriaa, jonka mukaan maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimien arvot laskevat epälineaarisesti puristusjännityksen noustessa. Tähän saattaa olla syynä koekappaleiden rajapintojen muodonmuutokset, jotka aiheutuvat materiaalin maksimipuristusjännityksen ylittymisestä. Pienemmillä jännityksillä pintojen karheushuippujen deformaatio on pienempää,

mutta suuremmilla jännityksillä, kun kontaktipintojen huiput deformatuivat enemmän ja mahdollisesti murtuvat, pintojen karheusprofiili muuttuu. Jos pintojen karheushuiput painuvat kasaan, pinnoista tulee sileämpiä kuin ne olivat ennen puristusta. Kun pinnoista tulee sileämpiä, eivät ne voi tarttua toisiinsa kiinni yhtä hyvin kuin karheampina ja tästä syystä ne liukuvat helpommin toistensa päällä aiheuttaen pienemmän kitkavoiman ja -kertoimen.

Yhteistä ensimmäisen kappaleen alussa mainituille materiaalipareille on, että kitkapintojen muodonmuutokset ovat silminnäkettäviä erityisesti ~ 5 , ~ 9 ja ~ 10 N/mm² puristuksilla. Muodonmuutokset ilmenevät materiaalien deformatumisena ja kulumisena. Tämä havainnollistaa kitkapintojen muodonmuutokset konkreettisesti, ja vahvistaa käsitystä siitä, että pintojen todelliset kontaktipinta-alat muuttuvat. Koekappaleiden pintojen muodonmuutokset olivat vielä viikkoja koestusten jälkeen selvästi nähtävillä. Tämä tarkoittaa sitä, että puun elastinen deformaatiokapasiteetti on ylittynyt ja deformaatio on siirtynyt viskoosisen muodonmuutoksen alueelle. Materiaalipareilla 2.LVL-LVL ja 4.CLT-LVL elastisen muodonmuutoksen rajan ylittyminen on odotettua, sillä LVL-koekappaleiden pääkantosuunnan syyt eivät ole kitkapintoja vastaan. Normaalivoimasta aiheutuva puristus on toisin sanoen syitä vastaan kohtisuoraan eikä puristuslujuus ole tällöin yhtä suuri kuin syiden suuntaisesti.

Jos kaksi eri materiaalia ovat kontaktissa toistensa kanssa, heikomman materiaalin pinnan karheushuiput antavat periksi. Luvun 3.2 Kuva 22:ssa on esitetty, miten puristava normaali-voima jakautuu todellisuudessa kontaktipintojen välillä. 6.LVL-teräs-parilla lujemman materiaalin eli teräksen karheushuiput ovat puristaneet LVL-lapepintojen karheushuippuja kasaan tehden LVL:n lapepinnoista sileämpiä ja vastaanottavaisempia kappaleen liukumiselle. Sama ilmiö voi olla syynä materiaaliparin 3.CLT-LVL maksimiliukukitkakertoimien muutoksiin, sillä lujemman LVL-kappaleiden pinnat deformatuivat selkeästi vähemmän kuin heikompi CLT. Pienet 5.CLT-CLT-kappaleet ovat käytännössä sahataravaa, ja kitkakertoimien arvojen lasku voidaan perustella Seki et al. (2013) tekemien johtopäätösten mukaan. Sahatarava deformatuu merkittävästi syitä vastaan kohtisuoraan vaikuttavan korkean puristusjännityksen johdosta, koska puun soluseinämät lommahtavat ja soluontelon tilavuus tällöin laskee (Seki et al. 2013). Soluseinämien ja -onteloiden muutokset vaikuttavat puisten kitkapintojen ominaisuuksiin ja näin ollen kitkakertoimiin.

Luvussa 5.4.1 todettiin, että 1.LVL-LVL-parille saatujen kitkakertoimien arvojen perusteella regressiomallien mukaan kitkakertoimet eivät ole riippuvaisia puristusjännityksestä. Tarkastelemalla maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimien pistediagrammeja, voidaan kuitenkin todeta, että puristusjännityksen suuruudella on merkitystä kitkakertoimien arvoihin. Vaikka puristusjännitys nousee ~ 1 :stä ~ 10 :n N/mm² puristukseen, sekä maksimiliukukitka- että liukukitkakertoimien arvot pysyvät käytännössä samalla tasolla. Luvun 4 kirjallisuuskatsauksessa ei kohdattu tieteellisten julkaisuja tai kirjallisuutta, joissa olisi tutkittu LVL:n syitä vastaan kohtisuorien kontaktipintojen välistä kitkaa suuri jännityksillä. Tästä syystä materiaaliparin 1.LVL-LVL kitkakertoimille oletettiin ennen koestuksia, että kitkakertoimien arvot laskisivat puristusjännityksen noustessa.

LVL:n ristiinlaminoidun X-laadun puristuslujuus on korkea. ~ 10 N/mm² puristusjännitysten jälkeen koekappaleiden kitkapinnat olivat silminnähden deformatuneet selvästi vähemmän kuin muiden materiaaliparien kontaktipinnat samalla puristuksella. Syy tähän saattaa olla se, että LVL:n syitä vastaan kohtisuorien pintojen muodonmuutokset tapahtuivat enimmäkseen materiaalin elastisen deformaation alueella. Viskoosisen deformaation osuus oli mahdollisesti suhteellisen pieni suuremmilla jännityksillä. Saattaa olla mahdollista, että viskoosisen

deformaation osuuden ollessa suhteellisen pieni osa kokonaisdeformaatiosta, kontaktipintojen rakenteessa ei tapahtunut suuri muutoksia. Koska kontaktipintojen rakenteessa ja ominaisuuksissa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia, kitkakertoimien arvot pysyivät samana puristusjännityksen noususta huolimatta. On mahdollista, että myös LVL:n X-laadun kitkakertoimien arvo lähtisi laskuun, jos materiaalia koestettaisiin yli 10 N/mm^2 puristuksella, joka ylittäisi selvästi viskoosisen deformaation rajan.

Materiaaliparien 2.LVL-LVL ja 3.CLT-LVL liukukitkakertoimien arvojen havaittiin nousevan puristusjännityksen kasvaessa. Molempien materiaaliparien regressiomallien selitykset olivat kohtuullisen korkeat molempien mallien ollessa tilastollisesti merkittäviä. Liukukitkakertoimien arvot nousevat, koska puristusjännityksen noustessa ero maksimiliukukitka- ja liukukitkavoimien arvojen suuruuden välillä ovat pienenevät. Syy maksimiliukukitka- ja liukukitkavoimien arvojen eroon saattaa olla kontaktipintojen rakenteen muodonmuutoksessa. Kun puristusjännitys on suuri, kappaleet painuvat toisiinsa helpommin elastisen deformaatiokapasitetin ylittyessä. Tämä on nähtävissä kappaleiden kitkapinnoista varsinkin $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksen jälkeen. Koska kontaktipintojen deformatiivisuus on suurta, pinnat painuvat ja lukittuvat lujemmin toisiinsa kiinni. Koska pinnat ovat lujemmin kiinni toisistaan, niiden liikkeen ylläpitämiseen tarvitaan suurempi voima. Päätelmä voi pitää paikkansa, koska kokeiden tuloksista voidaan nähdä, että suuremmilla jännityksillä työntävän kappaleen liikuttamiseen tarvitaan suurempi kitkavoima suhteessa maksimiliukukitkavoimaan. Puristuksen ollessa pienempää pinnat eivät lukkiudu yhtä paljon toisiinsa, ja siksi niiden liikkeen ylläpitämiseen riittää pienempi työntävä voima maksimiliukukitkavoiman suhteen.

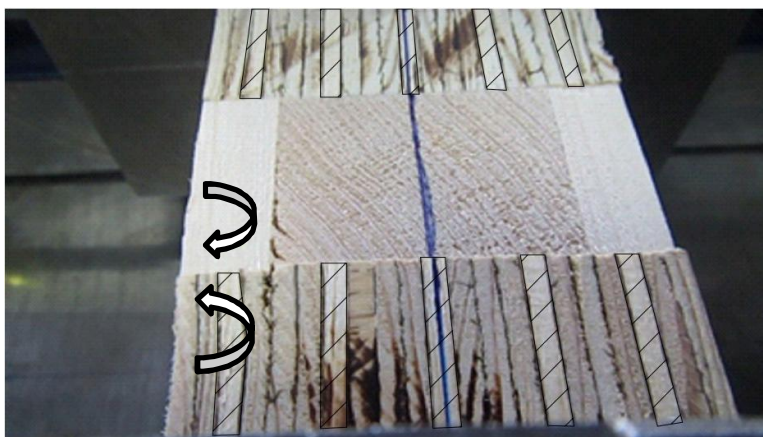
Materiaaliparien kitkakertoimia tarkastellessa, oleellista on myös tarkastella yksittäisen materiaaliparin variaatiokertoimien muutoksia puristusjännityksen muutoksen suhteen. Materiaaliparista riippuen kitkakertoimien arvot asettuivat lähemmäksi tai kauemmaksi toisiaan, kun kappaleiden välistä puristusjännitystä nostettiin. Mitä pienempi tietyn puristusjännityksen kitkakertoimen variaatiokerroin on, sitä vähemmän mittaustulokset eroavat toisistaan. Mittaustuloksia voidaan pitää käytännössä luotettavimpina yksittäisen materiaaliparin tietyllä puristusjännityksellä, kun variaatiokerroin on mahdollisimman pieni. Materiaaliparien maksimiliukukitkakertoimien variaatiokertoimissa havaittiin pääsääntöisesti laskevaa trendiä puristusjännityksen noustessa. Liukukitkakertoimien variaatiokertoimet yleensä kasvoivat, kun puristusta lisättiin. Variaatiokertoimien muutoksiin vaikuttavat mahdollisesti edellä mainitut koekappaleiden kontaktipintojen muodonmuutokset. On myös mahdollista, että kitkakertoimien arvojen vaihteluun vaikuttaa pintojen lukkiutuminen ja stick-slip-liikkeen voimakkuus.

1.LVL-LVL-materiaaliparin, jonka pääkantosuunnan syyt olivat kohtisuoraan kitkapintoja vastaan, maksimiliukukitkakertoimet olivat pääsääntöisesti suuremmat kuin materiaaliparilla 2.LVL-LVL, jonka syyt olivat kitkapintojen suuntaisesti. Molempien liukukitkakertoimet pysyivät käytännössä samalla tasolla 1.LVL-LVL-parin kertoimien ollessa pääsääntöisesti hieman suuremmat. 3.CLT-LVL- ja 4.CLT-LVL-parilla havaittiin sama ilmiö. Havainnot ovat samankaltaisia kuin Bejo et al. (2000) tekemässä tutkimuksessa, jossa varioitiin LVL-kappaleiden syiden suuntaa ja puristusjännityksen suuruutta. Kun pääkantosuunnan syyt olivat kohtisuoraan kitkapintoja vasten, ne lukittuivat toisiinsa paremmin ja näin vastustivat enemmän ulkoista työntävää voimaa.

Kitkakertoimien arvojen eroa syiden suunnan perusteella tukee luvussa 4.1.2 esitetty teoria, jonka mukaan suurin kitkavoima ilmenee, kun ulkoinen kuorma kuormittaa työnnettävää puukappaletta syitä vastaan kohtisuoraan. Tutkimuksen tulokset tukevat myös toista luvun 4.1.2 teoriaa, että kitkakertoimet ovat pienemmät, kun kuormitettavan kappaleen syyt ovat samansuuntaiset ulkoisen voiman kanssa. Luvussa 4.1.3 taas esitettiin, että syitä vastaan kohtisuorat pinnat ovat paljon karkeampia kuin syiden suuntaiset pinnat, mitkä johtavat pintojen eri karheuksiin ja näin erisuuruisiin kitkakertoimiin. Tämän tutkimuksen tulokset tukevat väitettä eri karheuksien eri kitkakertoimista, sillä 1.LVL-LVL:n ja 3.CLT-LVL:n kitkakertoimet olivat suuremmat kuin 2.LVL-LVL:n ja 4. CLT-LVL:n.

Vaikka pintojen karheuksien mittaaminen kokeellisesti ei ollut resurssien puitteissa mahdollista tämän tutkimuksen yhteydessä, LVL:n pääkantosuunnan syitä vastaan kohtisuorien ja syiden suuntaisten pintojen karheudet olivat aistinvaraisesti havaittavissa. 2.LVL-LVL-parin koekappaleet liikkuivat selvästi helpommin verrattuna 1.LVL-LVL-parin koekappaleisiin, kun kahta materiaaliparin koepalaa liikutettiin käsin toisiaan vasten. Materiaaliparien 1.LVL-LVL ja 3.CLT-LVL koetuksissa esiintyi enemmän stick-slipiä kuin pareilla 2.LVL-LVL ja 4.CLT-LVL, mikä tukee teoriaa karheammista kontaktipinnoista. Jos pinnat ovat sileitä, ne eivät lukkiudu toisiinsa yhtä helposti kuin karheat pinnat. Karheat pinnat aiheuttavat nykivää stick-slip-liikettä liukumisen aikana, koska liukuessaan korkeat karheushuiput jäävät kiinni hetkeksi vastakkaisiin karheushuippuihin kasvattaen työntävän voiman suuruutta hetkellisesti kunnes vastakkainen karheushuippu on ylitetty tai murtunut.

Materiaaliparin 4.CLT-LVL koekappaleiden murtuminen $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksesta ennen kitkakoestuksia johtuu LVL-koekappaleiden syitä vastaan kohtisuoran puristuslujuuden ylitymisestä. Koekappaleiden puristus videokuvattiin, ja murtotapahtumia arvioitiin jälkikäteen hidastuksella videolta. Videolta nähdään, että LVL-kappaleiden ulkolamellit alkavat deformatua CLT-kappaleen ulkolamellien kohdalta syitä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen ylittyessä (Kuva 75). Kun LVL:n ulkolamellit deformatuvat enemmän, tapahtuu niissä lokaalia taivutusta, joka murtaa sekä CLT- että LVL-kappaleet. Ilmiöllä ei ole sinänsä tämän tutkimuksen rajauksen puitteissa merkitystä, sillä LVL:n X-laadun asennus- ja pääkantosuunta väliseinärakenteissa on eri kuin kyseenomaisella materiaaliparilla.



Kuva 75. Koekappaleet hetkeä ennen 4.CLT-LVL-parin puristumurtoa $\sim 10 \text{ N/mm}^2$ puristuksella. LVL:n syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus on ylittynyt, joka on aiheuttanut lokaalia epäkeskeisyyttä puristavaan normaalivoimaan. Rasteroitujen viilujen syyt ovat kohtisuoraan kontaktipintoja vastaan.

Koestusten 3.CL-10-1 ja 5.CC-5-1...5.CC-10-3 seitsemän CLT-koekappaletta murtuivat kitkakokeiden aikana ristikkäisten lamellien rajapinnoista eikä kitkakertoimia voitu näin ollen määrittää luotettavasti. Koekappaleet lukittuivat niin lujasti toisiinsa kiinni, että kappaleet murtuivat ennen kuin ne lähtivät liikkeelle. Murtuneiden koekappaleiden maksimiliukukitkavoimat ~ 5 ja ~ 10 N/mm² puristusjännityksillä ovat siis todellisuudessa suuremmat. CLT-kappaleet murtuivat kolmella eri murtomekanismilla: ulommaisten lamellien syiden tangentin suuntaisesti rolling shear -lujuuden, lamellien välisen liimauksen vääntöleikkauslujuuden ja keskimmäisen lamellin syiden suuntaisen leikkauslujuuden ylittymisestä. Kappaleet murtuivat yhden murtomekanismin sijasta kahden tai kolmen eri murtomekanismin yhdistelmällä. Liitteessä 3 edellä mainituille CLT:n leikkausmurtomekanismeille on laskettu kaavojen (2) ja (3) avulla laskennalliset leikkausvoimien ylärajat kullekin ominaisleikkauslujuudelle.

Leikkauskestävyyksien ominaisarvojen ylärajat lamellien välisen liimauksen vääntöleikkaukselle, lamellikerrosten lautojen rolling shear -lujuudelle ja syiden suuntaiselle leikkauslujuudelle ovat 18,5 kN; 4,9 kN ja 15,6 kN samassa järjestyksessä. Murtuneiden CLT-koekappaleiden murtovoimat olivat 20,8...27,0 kN välillä. Kokeissa mitatut murtovoimat ovat ilmeisen suurempia kuin leikkauslujuuksien laskennalliset ylärajat. Toisaalta, kirjallisuudessa ja mitoitusohjeissa annetut leikkauslujuuksien ominaisarvot ovat alemman 5-persenttiin lujuusarvoja, joten puun todelliset lujuusarvot ovat todennäköisesti aina suuremmat kuin mitoitusta varten annetut ominaisarvot.

CLT-kappaleiden laskennallisia ylärajoja tarkastellessa voisi päätellä, että kaikki kappaleet ovat murtuneet ensin heikoimman leikkauslujuuden eli rolling shear -lujuuden ylittyessä. Wallner-Novak et al. (2014) kuitenkin toteavat, että rolling shear -lujuus saattaa ylittyä luuvissa 2.5 esitetyllä murtomekanismilla 1 lokaalien kuormitusten tapauksissa. Rolling shear -leikkausmurto ei ole välttämättä ensisijainen syy seinärakenteiden leikkausmurtoon. Rolling shear -lujuuden ylittyminen on ilmiö, joka tulee normaalisti esiin taivutetuilla CLT-laatoilla jänneväliä kohtisuoraan olevilla lamellikerroksilla (Wallner-Novak et al. 2014). Koska koekappaleet murtuivat kahdella tai kolmella eri murtomekanismilla, on murto saattanut tapahtua ensiksi liimauksen vääntöleikkauksen tai syiden suuntaisen leikkauslujuuden ylittyessä ja vasta sitten rolling shear -lujuuden ylittyessä. Jos maksimiliukukitkakertoimet määritettäisiin murtovoimilla, olisivat ne 5.CC-5 pareille 0,31...0,35, 5.CC-10 pareille 0,18...0,21 ja 3.CL-10-1 parille 0,33. Todellisuudessa CLT-seinäelementtien leikkausmurrot eivät todennäköisesti tapahtuisi samoilla puristusjännityksillä, koska leikkaukselle alttiit poikkipinta-alat ovat huomattavan paljon suuremmat kuin tämän tutkimuksen koestuksissa.

Materiaaliparin 5.CC-1 koestuksen pienten ja oikeiden koekappaleiden väliset maksimiliukukitka- ja liukukitka- ja variaatiokertoimien arvojen todettiin olevat samaa suuruusluokkaa. Tämä saattaa tarkoittaa sitä, että oikeilla CLT-koekappaleilla ulkoisen työntävän voiman on syrjäytettävä ulkolamellien karheamman pinnan aiheuttama maksimiliukukitkakitkavoima kappaleen liikkeelle lähtemiseksi. Tämän tutkimuksen havaintojen perusteella ei voida kuitenkaan varmuudella sanoa ilmiön paikkansapitävyydestä oikeiden ja pienten koekappaleiden pintojen erilaisen rakenteen takia. Kuten oikeilla 5.CC-10 koestuksilla, koekappaleiden ulkoinen murtovoima oli suurempi kuin maksimiliukukitka- ja liukukitkavoimat. Todelliset maksimiliukukitka- ja liukukitkavoimien arvot ovat todellisuudessa suuremmat CLT-ulkolamellien välisille pinnoille.

$\sim 1 \text{ N/mm}^2$ puristuksen pitkäaikaiskokeissa 1.LVL-LVL-parin maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimen arvo olivat lyhytaikaiskokeiden kitkakertoimien arvoja suurempi. Vastavasti 5.CLT-CLT-parilla maksimiliukukitkakerroin oli lyhytaikaiskoiden kertoimia pienempi, ja liukukitkakerroin samalla tasolla lyhytaikaiskokeiden kanssa. LVL-LVL-parin kitkakertoimen suurempi arvo saattaa johtua koekappaleiden virumasta puristusjännityksen alaisuudessa. LVL-kappaleiden viilut ovat deformatuneet puristusjännityksen aiheuttaman viruman ansiosta niin, että pintojen karheushuiput ovat uponneet toisiinsa. Karheushuippujen limittyminen toisiinsa on aiheuttanut voimakkaamman lukkiutumisen pintojen kanssa, minkä takia maksimiliukukitka- ja liukukitkavoimien on pitänyt nousta suuremmiksi kuin lyhytaikaiskokeilla keskikappaleen liikuttamiseksi. CLT-CLT-parin maksimiliukukitkakertoimen alempaan tulokseen on saattanut vaikuttaa ulkolamellien puiden soluseinämiä lommahdus samalla tavalla, kuten pienillä 5.CLT-CLT-parin lyhytaikaiskoestuksilla. Tosin liukukitkakertoimen arvo antaa ymmärtää, että pitkäaikainen puristusjännitys ei ole vaikuttanut CLT-kappaleiden pinnan rakenteeseen. Koska molemmille pareille tehtiin vain yksi pitkäaikaiskoestus, saattavat kitkakertoimien tulosten arvot olla sattumaa. Materiaalien kitkäkäyttäytymistä pitkäaikaisen puristusjännityksen alaisuudessa on syytä tarkastella tulevilla tutkimuksissa.

Tulosten arvioidessa on hyvä tiedostaa, että kunkin materiaaliparin koestuksen otoslukumäärät ovat olleet suhteellisen pieniä. Seuraavissa vastaavissa tutkimuksissa koestusten otoksia pitäisi olla useampi, jotta kitkakertoimille nähdään selkeät ylä- ja alarajat tietyllä puristusjännityksellä. Yksi selkeästi muista otoksista poikkeava mittaustulos saattaa muuttaa edellä esitettyjä regressiomalleja. Kitkakertoimien regressiomallien sovitefunktioiden muodot ja mallien selitysasteet saattavat muuttua oleellisesti, jos otoskokoa kasvatettaisiin. Regressiomallien voidaan esittää toimivan vain tässä tutkimuksessa määritettyjen puristusjännitysten välillä. Regressiomallien avulla ei voida ennustaa, miten kitkakertoimet käyttäytyvät alle 1 N/mm^2 puristuksella sekä teräksellä yli 9 N/mm^2 ja CLT- ja LVL-tuotteilla yli 10 N/mm^2 puristuksella. Tulosten tarkastelun kannalta ei ole niinkään oleellista millä tavalla mittaus tulokset käyttäytyvät vaan mihin suuntaan mittaustulokset suuntautuvat, kun puristusjännitystä nostetaan.

7 Johtopäätökset

Tämän diplomityön päätavoitteena oli tutkia lepo- ja liukukitkan olemassaoloa ja suuruutta CLT- ja LVL-väliseinäelementtien välillä sekä miten kitkavoima voidaan hyödyntää kantavien väliseinien vaakaliitosten suunnittelussa. Ensimmäinen tutkimustavoite oli perehtyä massiivipuulementtirakentamiseen, -rakentamisjärjestelmään ja rakentamisjärjestelmässä käytettyjen vaakaliitosten periaatteisiin. Työssä tutustuttiin myös vaakasuuntaisten leikkausvoimien ankkurointiin betonirakenteilla. Lisäksi tutustuttiin kitkan toimintaan yleisellä tasolla sekä puu-puu- ja puu-teräs-pinnoilla. Tutkimuksen kokeellisessa osuudessa CLT-, LVL- ja teräspintojen kitkaa tutkittiin laboratorio-olosuhteissa kolmen eri suuruusluokan puristusjännityksen alaisuudessa. Kokeellisten menetelmien avulla materiaalipareille määritettiin maksimiliukukitka- ja liukukitkakertoimet eri puristusjännityksillä. Lepokitkaa ei voitu määrittää luotettavasti siirtymäohjautulla kuormituksella.

Diplomityössä saatiin selville, että puupintojen kitkaan ja kitkan suuruuteen vaikuttavat monet eri tekijät samanaikaisesti. Vaikuttavat tekijät ovat pääsääntöisesti puulaji- tai tuote, puun kosteuspitoisuus, syiden suunta liukusuuntaan nähden, puun pinnan karheus ja puristusjännityksen suuruus. Kirjallisuudesta on ollut haastavaa löytää kitkakertoimia tietyille puun, ja erityisesti CLT:n ja LVL:n, materiaalipareille. Syy on ymmärrettävä, sillä monen eri tekijän

vaikuttaessa kitkakertoimien arvoihin yhtäaikaaisesti, joten selkeää ja yksiselitteistä ohjeistusta voi olla vaikea laatia. Tässä tutkimuksessa määritetyt kitkakertoimien arvot asettuivat välille 0,13...0,49, jolle kirjallisuudessa esitetyt puupintojen kitkakertoimet yleensä myös sijoittuvat.

Kitkan hyödyntäminen vaakasuuntaisten voimien ankkuroinnissa on ollut pitkään yleistä betonirakenteiden vaakasaumojen lujuuden mitoituksessa. Betonipinnoille kitkakertoimien määrittäminen on yksinkertaisempaa kuin puupinnoille, sillä vain betonipinnan laatu vaikuttaa kitkakertoimen arvoon. Betonipinnan yksinkertaisempi kitkakäyttäytyminen todennäköisesti on yksi syistä, miksi vakaasuuntaisille betoniliitoksille on luotu laskentamalleja liitosten mitoittamiselle. Toisaalta betonielementtirakentamista on tutkittu jo useamman vuosikymmenen ajan, joten työsauman kitkamallin kehittyminen on useamman vuoden tutkimustyön takana.

Tämän tutkimuksen materiaalipareilla kitkakertoimet laskivat tai esittivät laskemisen merkkejä, kun puristusjännitystä nostettiin. Jos kitkaa halutaan hyödyntää vaakavoimia vähentävänä voima, tulisi väliseinärakenteen mitoituksessa ja liukukitkakertoimen määrittämisessä ottaa huomioon suurin mahdollinen normaalivoimasta aiheutuva puristusjännitys. Tutkimustulosten perusteella tietyillä materiaalipareilla kitkakertoimien arvot muuttuvat oleellisesti, kun puristusjännitys viisin- tai kymmenkertaistuu. Jos CLT- ja LVL-väliseinäelementtien kontaktipintojen kitkakertoimien arvoja haluttaisiin nostaa, voitaisiin pintoja karhentaa mekaanisesti elementtitehtaalla ennen elementtien toimittamista työmaalle. Kun puupintojen välinen kitka on mahdollista ottaa huomioon vaakaliitosten mitoituksessa tulevilla suunnittelunormeilla, rakenteiden käyttöluokka on myös huomioitava kitkakertoimen arvoa määrittäessä. Kirjallisuuden ja tutkimusten mukaan kitkakertoimien arvot kasvavat mitä lähemmäksi puun kosteuspitoisuus nousee puun kyllästymispistettä.

Kuten kokeellisen osuuden tuloksista huomattiin, koestusten liukukitkavoimien arvot olivat maksimiliukukitkavoimien arvoja pienemmät. Tämä tarkoitti, että ulkoisen työntävän voiman piti syrjäyttää ensin maksimiliukukitkavoiman suuruus, jotta koekappale voisi saavuttaa tilanteen, jossa sen liiketila jatkuisi kuormaa kasvattamatta. Ilmiöstä voisi tehdä johtopäätöksen, että mitoitusstilanteessa kiinnitettäviä vaakavoimia voisi vähentää maksimiliukukitkavoiman suuruudella, koska käytettyjen liittimien leikkauskestävyys tulee teoriassa mukaan vaakaliitoksen toimintaan vasta, kun maksimiliukukitkavoiman suuruinen vaakavoima ylittyy. On kuitenkin huomioitava, että jos kantavan seinän liitososa pääsee sivusiirtymään maksimiliukukitkavoiman ylittyessä, seinän liitoksen kitkavoima siirtyy pienemmälle liukukitkavoiman alueelle, jolloin suurempi osa seinään vaikuttavasta vaakavoimasta siirtyy liittimien kestävyydelle. Liitinten kapasiteetti saattaa tällöin ylittyä, koska ne on mitoitettu pienemmälle kokonaisvaakavoimalle maksimiliukukitkavoimaa käytettäessä. Tästä syystä kantavien seinien vaakaliitosten mitoituksessa on konservatiivisempaa käyttää liukukitkakerointa, koska tällöin suurempi osuus kokonaisvaakavoimasta siirtyy liitinten lujuuden vastuulle. Liitoksen leikkausvoima voidaan mitoittaa itävaltalaisen proHolz Austrian ehdottaman kaavan (1) mukaan vähentämällä Eurokoodin mukaisesti 10% pysyvien pystykuormien resultantista, ja kertomalla tämä normaalivoima liukukitkakertoimella. Tällä tavalla liitoksen mitoituksessa ollaan varmallalla puolella. Toistaiseksi massiivipuulementtien vaakaliitoksille ei ole tarkempaa mitoituslaskelmaa kaavan (1) lisäksi. Tämän tutkimuksen perusteella mitoituksessa käytettävät liukukitkakertoimien minimiarvot olisivat koepareille LVL-LVL, CLT-LVL, CLT-CLT vain alle 1 N/mm^2 puristusjännityksellä ja LVL-teräs 0,19; 0,18; 0,35 ja 0,13 samassa järjestyksessä.

Koska CLT- ja LVL-ovat ortotrooppisia materiaaleja, ovat niiden lujuusominaisuudet eri suuruiset eri suuntiin. Erityisesti CLT:llä on ristiinlaminoinnin vuoksi monta erityyppistä leikkauslujuutta, joiden tulee kestää elementissä vaikuttavat leikkausvoimat. Vaikka kantavien väliseiniin vaakaliitosten mitoituksessa elementiltä toiselle siirtyvää vakaavoimaa vähennettäisiin kitkavoiman suuruisesti, tulee itse seinäelementit mitoittaa ulkoiselle vaakavoimalle ilman kitkavoiman vähentävää vaikutusta.

Tämän tutkimuksen kitkakokeiden perusteella CLT-LVL-materiaalipari 3:n kokeet pitäisi suorittaa uudestaan yhtä leveillä koekappaleilla, jotta CLT-pinta saataisiin täyteen kontaktiin LVL-pintojen kanssa. Tällä tavalla kitkapinnat ja tulokset olisivat lähempänä todellisen liitoksen kontaktipintoja. Jos CLT-levyn ulkolamellit olisivat täysin kontaktissa LVL-pintoja vastaan, pintojen välinen kitkakerroin olisi oletettavasti suurempi, sillä ulkolamellien syitä vastaan kohtisuorat pinnat ovat huomattavasti karheammat kuin sileämpi keskilamellin pinta. Kitkakokeiden otosmäärä yhtä materiaaliparia ja puristusjännitystä kohti oli pieni, ja otoksia kasvattamalla kitkakertoimien trendit puristusjännitystä kasvattamalla olisivat tulleet todennäköisesti selkeämmin esiin. Myös regressiomallit olisivat olleet mahdollisesti luotettavammat ja selittävämmät. LVL:n lapepinnan ja teräksen välistä kitkaa voisi jatkossa tutkia tarkemmin eri karheuskeskiarvoja omaavilla teräksillä, sillä teräspinnan viimeistely vaikuttaa pinnan karheuteen ja näin kontaktipintojen väliseen kitkaan suuruuteen. Keskimäisten koekappaleiden alapintoihin olisi pitänyt asentaa siirtymäanturi koekappaleiden kokoonpuristuman mittaamiseksi. Kokoonpuristuman mittauksella olisi voitu arvioida puisten koekappaleiden deformaation suuruutta, ja vaikuttaako deformaatio elastisella vai viskoosisella alueella. Lepokitkakertoimet olisi voitu määrittää voimaohjatulla kuormituksella, ja liukukitkakertoimet tämän jälkeen siirtymäohjatulla kuormituksella.

Materiaaliparien 1., 3, ja 5. välistä kitkaa voisi tutkia 10 N/mm^2 suuremmilla puristusjännityksillä ja tarkastella laskevatko materiaaliparien väliset kitkakertoimien arvot vai tasaantuvatko ne suuremman puristuksen alaisuudessa. Yli 10 N/mm^2 puristuksen kokeilla tulisi tosin varmistaa, että CLT-koekappaleissa olisi riittävästi leikkauspinta-alaa ulkoisista voimista aiheutuvia sisäisiä leikkausjännityksiä vastaan. Varsinkin LVL-LVL-materiaaliparilla 1. tulisi tarkastella, miten pintojen välinen kitka käyttäytyy yli 10 N/mm^2 puristusjännitysten alaisuudessa, sillä tämän tutkimuksen tulosten perusteella puristusjännityksen suuruus ei vaikuttanut kitkakertoimiin. Tämän diplomityön kokeellisessa osuudessa tehdyt havainnot ja saadut tulokset ovat hyväksyttävissä vain samoille materiaaleille ja samalevyisille massiivipuupaneeleille $1 \dots 10 \text{ N/mm}^2$ suuruisilla puristusjännityksillä. Kontaktipintojen rakenne ja karheus saattavat muuttua, jos LVL- ja CLT-paneeleihin lisätään tai vähennetään erisuuntaisia lamellikerroksia.

Tämän tutkimuksen tulosten mukaan parhaiten voitaisiin hyödyntää LVL-lapepinta-teräslevy-parin liukukitkaa kantaviin seiniin kohdistuvan vaakavoiman vähentävänä voimana. Edellä mainitun materiaaliparin maksimiliukukitka- ja liukukitka käyttäytyivät luotettavasti regressiomallien mukaan. Lisäksi LVL-teräs-parin koeasettelu on lähellä todellista, luvun 2.3 mukaista liitosta. Toisaalta tutkimuksessa määritetyt liukukitkakertoimet materiaaliparille eivät olleet järkeviä varsinkin $\sim 9 \text{ N/mm}^2$ puristuksella, joten kokonaisvoimaa vähentävän liukukitkan suuruus ei ole kovin suuri. Teräslevyllä on kuitenkin huomattavasti suurempi leikkauskestävyys kuin Johdannossa esitetyllä vanerilla, minkä ansiosta sen leikkauslujuus ei tule mitoittavaksi tekijäksi liitoksessa. Tulosten perusteella liukukitkaa voitaisiin

käyttää vähentävänä tekijänä suhteellisen luotettavasti myös LVL-LVL-liitoksessa materiaali- ja tulosten perusteella, koska puristusjännitys ei vaikuttanut kitkakertoimien suuruuteen.

Vaikka puurakentaminen on vielä pientä Suomessa, uusia puukerrostaloja on rakennettu ja aloitettu rakentamaan useita tällä vuosikymmenellä. Viime vuosina Suomeen on tehty myös monta investointia massiivipuutuotetehtaiden ja -tuotteiden valmistamiseksi. On siis odotettavissa, että puurakentaminen tulee kasvamaan ja kehittymään seuraavien vuosien aikana, sillä trendi näyttää nousevalta. Jotta puurakentaminen voi kehittyä varteenotettavaksi vaihtoehtoksi aina rakennuttajasta käyttäjälle, tulee rakennukset suunnitella ja rakentaa mahdollisimman kustannustehokkaiksi ja turvallisiksi. Tämä tutkimus ja siinä tehdyt havainnot toimivat pohjana seuraaville vaakaliitosten kitkatutkimuksille, jotta kantavien massiivipuisten seinien kontaktista aiheutuvan kitkan hyödyntäminen sitä vastustavassa kuormankantokapasiteetissa olisi tulevaisuuden suunnitteluohjeissa ja -määräyksissä normaali käytäntö.

Lähdeluettelo

Aira, J.R. et al., 2014. Static and kinetic friction coefficients of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), parallel and perpendicular to grain direction. *Materiales de Construcción*. [Verkkolehti]. Vol. 64:315. [Viitattu 27.4.2017]. Saatavissa: <http://materconstrucc.revistas.csic.es/index.php/materconstrucc/article/view/1482/1746> ISSN 0465-2746 (painettu) ISSN 1988-3226 (sähköinen).

Amontons, G., 1699. De la resistance causée dans les Machines, tant par les frottemens des parties qui les composent, que par roideur des cordes qu'on y employe, & la maniere de calculer l'un & l'autre. *Histoire de l'Académie royale des sciences*. [Verkkolehti]. Mémoires de l'Académie royale des sciences. S.206–222 [Viitattu 31.3.2017]. Saatavissa: <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k35013>

Ashby, Michael F. Jones & David R. H. 2012. *Engineering Materials 1 - An Introduction to Properties, Applications, and Design*. 4th Edition. Elsevier. 466 s. ISBN 978-0-0809-6666-3 (sähköinen).

Ashby, Michael F., Cebon, D & Shercliff, H. 2007. *Materials – Engineering Science, Processing and Design*. 1st Edition. Elsevier Science. 527 s. ISBN 978-0-0804-7149-5 (sähköinen).

Avallone, E.A., Baumeister, T.I. & Sadegh, A.M. 2007. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*. 11th ed. The McGraw-Hill Companies, Inc. ISBN 978-0-07-142867-5 (sähköinen).

Bejo, L., Lang, E.M. & Fodor, T. 2000. Friction coefficients of wood-based structural composites. *Forest Products Journal*. Vol. 50:3. S.39–43. ISSN 00157473.

Bhushan, Bharat & Petralia, Paul. 2013. *Principles and Applications of Tribology*. 2nd Edition. Wiley. 1008 s. ISBN 978-1-1184-0300-6 (sähköinen).

Blaß, H.J. & Uibel, T. 2006. Load carrying capacity of joints with dowel type fasteners in solid wood panels. CIB-W18-konferenssissa. [Verkkolehti]. Florence: CIB-W18. [Viitattu 31.7.2017]. Saatavissa: http://cib-w18.com/sites/default/files/proceedings/no._39_florence_italy_august_2006.pdf

Blaß, H.J. & Uibel, T. 2007. Tragfähigkeit von stiftförmigen Verbindungsmitteln in Brettsper Holz. *Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau*. Vol. 8. 193 s. ISSN 1860-093X.

Blau, P.J. 1992. *ASM Handbook, Volume 18 - Friction, Lubrication, and Wear Technology*. 10th ed. Yhdysvallat: ASM International. 1879 s. ISBN 0-87170-380-7.

Blau, P.J. 2009. *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*. 2nd ed. Boca Raton, USA: CRC Press. 420 s. ISBN 978-1-4200-5404-0.

Bogensperger, T., Moosbrugger, T. & Silly, G. 2010. Verification of CLT-plates under loads in plane. WCTE 2010 - 11th World Conference on Timber Engineering-konferenssissa. [Verkkolehti]. Riva del Garda: WCTE. [Viitattu 15.8.2017]. Saatavissa: http://www.researchgate.net/publication/265653209_Verification_of_CLT-

plates_under_loads_in_plane

DIN 1052:2004-08. 2004. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau. Saksa: Deutsches Institut für Normung.

Fallis, A., Gagnon, S. & Pirvu, C. 2011. CLT Handbook: Cross-Laminated Timber. Québec, Kanada: FPInnovations. 626 s. ISBN 978-0-86488-547-0 (sähköinen).

Forest Products Laboratory. 2010. Wood Handbook: Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Madison, Yhdysvallat: Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 s. ISBN 1892529025 (sähköinen).

Ilmonen, P. 2016. Luento 7: Lineaarinen regressio. Tilastollisen analyysin perusteet. Kurssimateriaali.

Johnson, K.L. 2003. Contact mechanics. 9th ed. Cambridge, Yhdistynyt kuningaskunta: Cambridge University Press. 462 s. ISBN 0-5213-4796-3 (sähköinen).

Junttila, J. 2015. Kitkaliitos puun ja värähtämisestimen välillä. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, talouden ja rakentamisen tiedekunta. Tampere. 79 s.

Juutilainen, J. & Tuomisto, J. 2002. Ympäristöterveys - kurssimateriaali. [Verkkolehti]. Kuopio: Kuopion yliopisto (nyk. Isä-Suomen yliopisto). [Viitattu 13.7.2017]. Saatavissa: http://web.archive.org/web/20050111173420fw_/http://www.uku.fi:80/avoin/ymp_terveys/oppimateriaali/ymp_tulostus2.pdf.

Kevarinmäki, A. 2002. Joints with Inclined Screws. CIB-W18-konferenssissa. [Verkkolehti]. Kyoto: CIB-W18. [Viitattu 12.4.2017]. Saatavissa: http://cib-w18.com/sites/default/files/proceedings/no._35_kyoto_japan_september_2002.pdf.

Kevarinmäki, A. 2014. CLT päivitykset RIL 205-1-2009 ohjeeseen. [Verkkolehti]. [Viitattu 15.8.2017]. Saatavissa: www.ril.fi/kirjakauppa/attachment/download/2656b4dddf8a0752ec8e3d392e1a9c6f

Kevarinmäki, A. 2017. RIL 205-1-2017 Puurakenteiden suunnitteluohje: Eurokoodi EN 1995-1-1. 1st ed. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 231 s. ISBN 978-951-758-604-7.

Kokkonen, P. 2017. Puurakenteet - Runkodetailit - Kantavat rakenteet / Wood City - Asunnot. Helsinki: Sweco Rakennetekniikka Oy.

Koubek, R. & Dedicova, K. 2014. Friction of wood on steel. [Verkkodokumentti]. Diplomityö. Linnaeus University, Faculty of Technology. Växjö. [Viitattu 26.5.2017]. Saatavissa: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:729796/FULLTEXT01.pdf>.

Koukkunen, A. 2017. Project Worker. Stora Enso. Sähköpostikeskustelu 3.7.2017 - RE: Diplomityö kitkan hyödyntämisestä vaakaliitoksissa / Labrakokeet.

Lai, M. et al. 2013. Study on nanometric cutting of germanium by molecular dynamics simulation. *Nanoscale Research Letters*. [Verkkolehti]. Vol. 8:1. Saatavissa: <http://nanoscalereslett.springeropen.com/articles/10.1186/1556-276X-8-13>. ISSN 1556-276X (sähköinen).

Leskelä, M. V. 2006. by 210 Betonirakenteiden suunnittelu ja mitoitus 2005. Helsinki: Suomen betoniyhdistys. 711 s. ISBN 952-5075-75-3.

Magoss, E. 2008. General Regularities of Wood Surface Roughness. *Acta Silvatica et Lignaria Hungarica*. [Verkkolehti]. Vol. 4:4. S.81–93. [Viitattu 16.5.2017]. Saatavissa: http://www.nyme.hu/fileadmin/dokumentumok/fmk/acta_silvatica/cikkek/Vol04-2008/08_magoss_p.pdf. ISSN 1787-064X (sähköinen).

Malkoçoğlu, A. 2007. Machining properties and surface roughness of various wood species planed in different conditions. *Building and Environment*. Vol. 42:7. S.2562–2567. ISSN 0360-1323.

Mattila, M. 2003a. Regressioanalyysin rajoitteet. Menetelmätietovaranto KvantiMOTV. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.7.2017]. Saatavissa: <http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/regressio/rajoitteet.html>.

Mattila, M. 2003b. Hajontaluvut. Menetelmätietovaranto KvantiMOTV. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 4.9.2017]. Saatavissa: <http://www.fsd.uta.fi/menetelmaopetus/hajontaluvut/hajontaluvut.html>

McKenzie, W.M. & Karpovich, H. 1968. The frictional behaviour of wood. *Wood Science and Technology*. [Verkkolehti]. Vol. 2:2. s.139–152. [Viitattu 2.5.2017]. Saatavissa: <http://link.springer.com/10.1007/BF00394962>. ISSN 0043-7719 (painettu) ISSN 1432-5225 (sähköinen).

Mellin, I. 2006. Tilastolliset menetelmät: Lineaarinen regressioanalyysi. [Verkkodokumentti]. S.231–433. [Viitattu 10.7.2017]. Saatavissa: <https://math.aalto.fi/opetus/sovtoda/oppikirja/Regranal.pdf>.

Metsäteollisuus ry. 2005. Vanerikäsikirja. Helsinki: Metsäteollisuus ry. 65 s. ISBN 952-9506-64-3 (sähköinen).

Murase, Y. 1984. Friction of wood sliding on various materials. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*. [Verkkolehti]. Vol. 28:4. S.147–160. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <http://catalog.lib.kyushu-u.ac.jp/handle/2324/23785/p147.pdf>. ISSN 0023-6152 (sähköinen).

Mäki-Petäjä, P. 2016. Puurakentamisen esteitä raivataan – Suomeen halutaan lisää puukerrostaloja. [Verkkouutinen]. MTV3 Uutiset Kotimaa. 6.9.2016. [Viitattu 2.3.2017]. Saatavissa: <http://www.mtv.fi/uutiset/kotimaa/artikkeli/puurakentamisen-esteita-raivataan-suomeen-halutaan-lisaa-puukerrostaloja/6061734>

Park, C.-Y. et al. 2011. Evaluation of Friction Properties According to Normal Force and

Direction of Wood Grain in Real Contact Area. Journal of the Korean Wood Science and Technology. [Verkkolehti]. Vol. 39:5. S.437–443. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=HMJGBP&py=2011&vnc=v39n5&sp=437>. ISSN 1017-0715.

Puttonen, J. 2017. Professori. Aalto-yliopiston Rakennustekniikan laitos. Sähköpostikeskustelu 30.8.2017 - Diplomityö: Kitkan hyödyntäminen massiivipuuelementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa / Ensimmäinen käsikirjoitus.

Puuinfo. 2011. Tekninen tiedote - Puun kosteuskäyttäytyminen. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 19.4.2017]. Saatavissa: http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/kysymyksiä-ja-vastauksia/puun_kosteuskayttaytyminen_lattia.pdf

Rowell, R.M. 2005. Handbook of wood chemistry and wood composites. Boca Raton, USA: CRC Press. 487 s. ISBN 0-8493-1588-3.

Santos, P.M.D. 2009. Assessment of the Shear Strength between Concrete Layers. [Verkkodokumentti]. Väitöskirja. University of Coimbra. Coimbra. [Viitattu 31.3.2017]. Saatavissa: [http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/betao%20novo%20\(concrete%20overlay\)/PhD_thesis_PSantos.pdf](http://www.civil.ist.utl.pt/~cristina/RREst/Aulas_Apresentacoes/07_Bibliografia/betao%20novo%20(concrete%20overlay)/PhD_thesis_PSantos.pdf).

Seki, M. et al. 2013. Wood friction characteristics during exposure to high pressure: Influence of wood/metal tool surface finishing conditions. Journal of Wood Science. [Verkkolehti]. Vol. 59:1. S.10–16. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10086-012-1295-1>. ISSN 1435-0211.

SFS-EN 12195-1. 2010. Maantieajoneuvojen kuormanvarmistus. Turvallisuus. Osa 1: Kiinnitysvoimien laskenta. 2. painos. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 90 s.

SFS-EN 1992-1-1 + A1 + A2 + AC. 2015. Eurokoodi 2 : Betonirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1 : yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 2. painos. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 218 s.

SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC. 2014. Eurokoodi 5. Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. 3. painos. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 222 s.

SFS-EN 1995-2. 2010. Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 2: Sillat. Helsinki. Suomen standardisoimisliitto SFS. 28 s.

Stachowiak, Gwidon & Batchelor, Andrew W. 2014. Engineering Tribology. 4th Edition. Elsevier Science. 883 s. ISBN 978-0-1239-7776-2 (sähköinen).

Statwing. 2014. Interpreting residual plots to improve your regression. Statwing Documentation - Statwing's approach to statistical testing. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 10.7.2017]. Saatavissa: <http://docs.statwing.com/interpreting-residual-plots-to-improve->

your-regression/.

Stora Enso. 2015a. Stora Enso CLT Puu – maailman vanhin ja myös modernein rakennusmateriaali. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.6.2017]. Saatavissa: https://issuu.com/storaenso/docs/stora_enso_clt_-_puu____maailman_v

Stora Enso. 2015b. Stora Enso CLT Technical brochure. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 8.6.2017]. Saatavissa: https://issuu.com/storaenso/docs/stora_enso_clt_-_technical_brochure

Stora Enso. 2016. Building Systems: Residential multi-storey buildings. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 17.3.2017]. Saatavissa: [http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/Residential Multistorey Buildings - Design Manual %5Bfinal 2016-06-20%3B version 1.4%5D EN.pdf](http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/Residential_Multistorey_Buildings_-_Design_Manual_%5Bfinal_2016-06-20%3B_version_1.4%5D_EN.pdf).

Stora Enso. 2017. LVL by Stora Enso Technical brochure. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 9.6.2017]. Saatavissa: http://assets.storaenso.com/se/buildingandliving/ProductServicesDocuments/LVL_Technical_Manual_EN_052917_light.pdf

Thelandersson, S. & Larsen, H.J. 2003. Timber engineering. Chichester: Wiley & Sons. 446 s. ISBN 0-470-84469-8.

Vitosytė, J., Ukvalbergienė, K. & Keturakis, G. 2015. Roughness of sanded wood surface: An impact of wood species, grain direction and grit size of abrasive material. Materials Science (MEDŽIAGOTYRA). [Verkkolehti]. Vol. 21:2. S.255–259. [Viitattu 16.5.2017]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/282060081_Roughness_of_Sanded_Wood_Surface_an_Impact_of_Wood_Species_Grain_Direction_and_Grit_Size_of_Abrasive_Material. ISSN 1392-1320.

Vuorinen, T. & Jantunen, J. 1997. Järeän sahatavaran käyttö rakennuksissa, rakennejärjestelmä ja liitokset. [Verkkodokumentti]. Vihti: Maatalouden tutkimuskeskus. [Viitattu 21.7.2017]. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/438854/vtselostus71.pdf?sequence=1%0A>.

Wallner-Novak, M., Koppelhuber, J. & Pock, K. 2014. Cross-Laminated Timber Structural Design - Basic design and engineering principles according to Eurocode. proHolz Austria. 189 s. ISBN 978-3-902926-03-6.

Xu, M. et al. 2014. Effects of Surface Roughness and Wood Grain on the Friction Coefficient of Wooden Materials for Wood–Wood Frictional Pair. Tribology Transactions. [Verkkolehti]. Vol. 57:5. S.871–878. [Viitattu 28.4.2017]. Saatavissa: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402004.2014.920064>. ISSN 1040-2004.

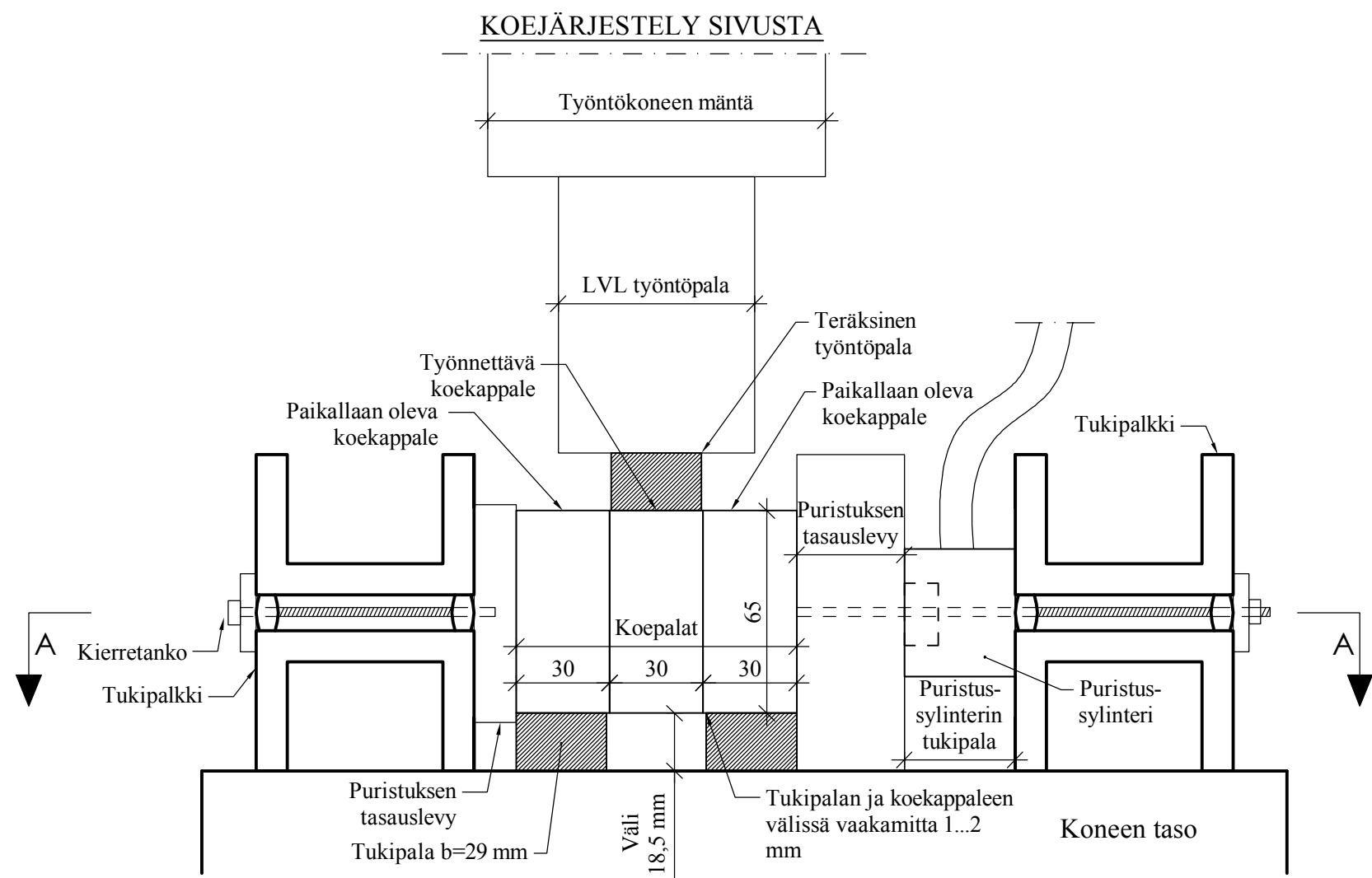
Young, C. 2017. Nonlinear Curve Fitting in Excel. EngineerExcel. [Verkkodokumentti]. [Viitattu 1.8.2017]. Saatavissa: <http://www.engineerexcel.com/nonlinear-curve-fitting-in-excel/>.

Liiteluettelo

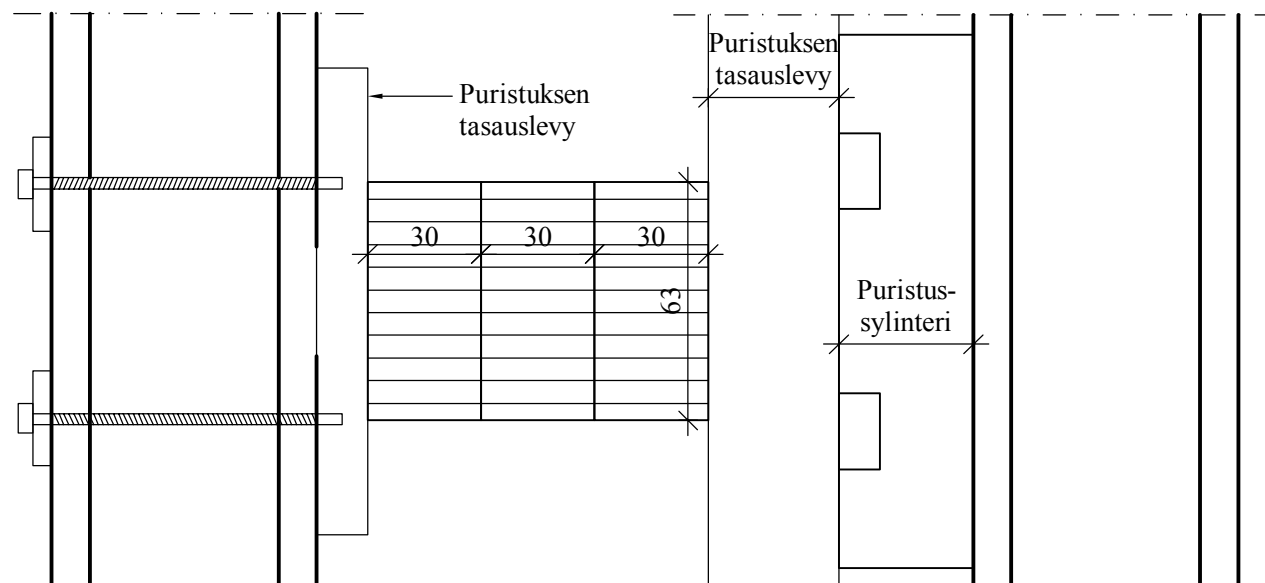
Liite 1. Materiaaliparien koejärjestelyt. 4 sivua.

Liite 2. Koekappaleiden työntövoima-siirtymä-kuvaajat. 20 sivua.

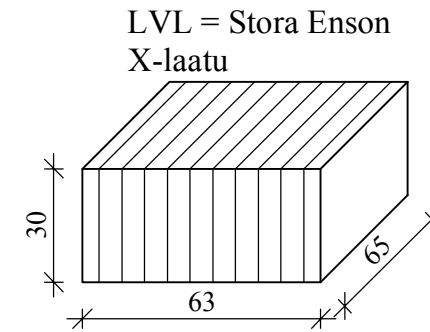
Liite 3. CLT-koekappaleiden laskennalliset leikkausmurtovoimat. 2 sivua.



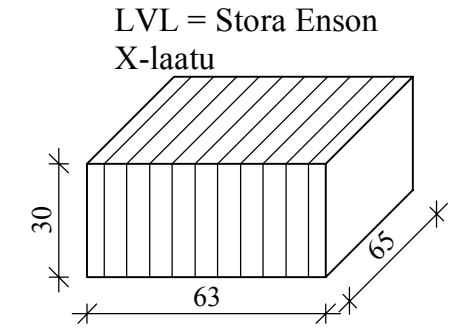
LEIKKAUS A-A



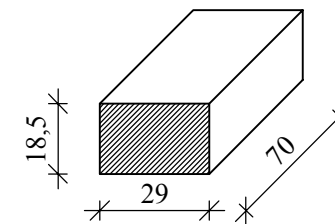
**TYÖNNETTÄVÄ
LVL-KOEKAPPALE**



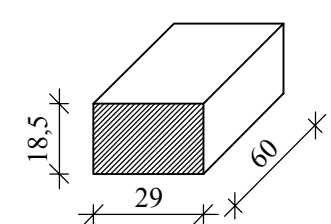
**PAIKALLAAN OLEVA
LVL-KOEKAPPALE**



**TUKIPALA,
TERÄSTÄ (2 kpl)**



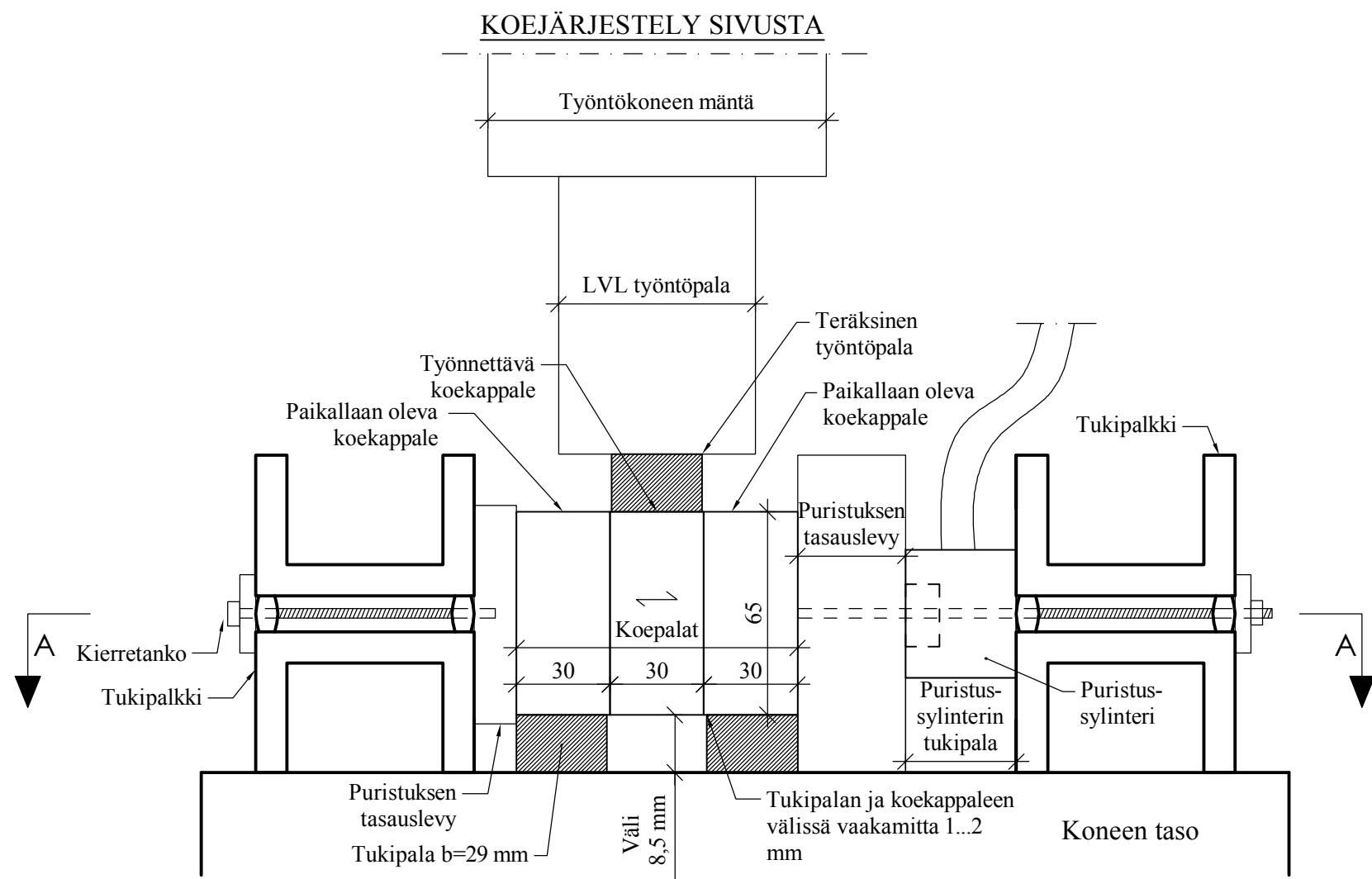
**TYÖNTÖPALA,
TERÄSTÄ (1 kpl)**



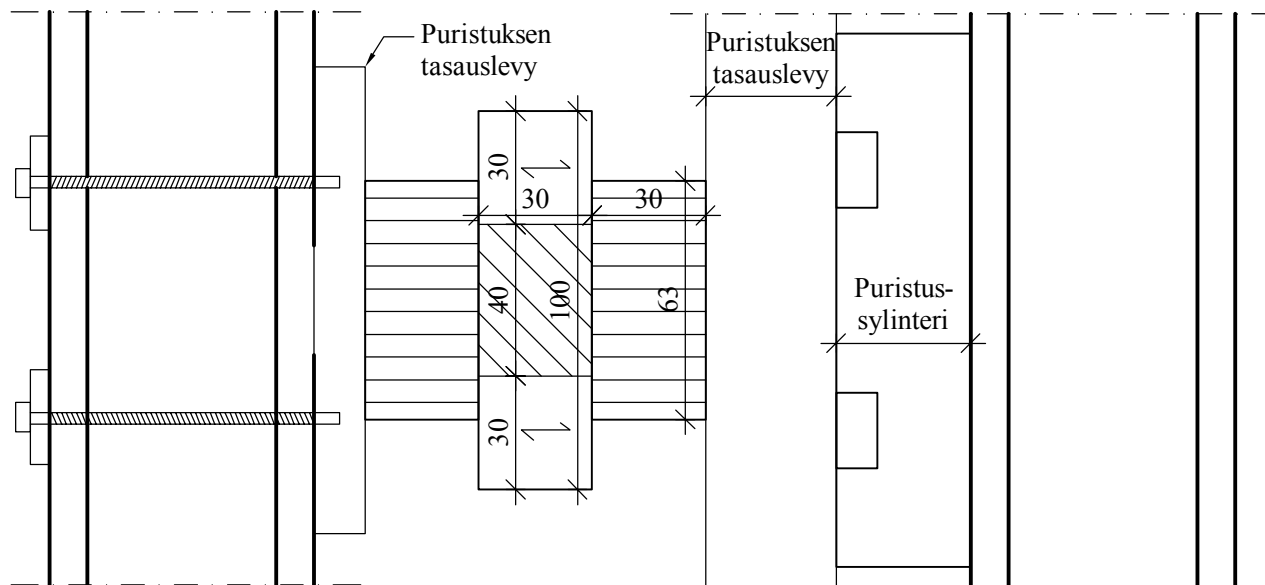
Tunn Lukum Muutos

Piirt Päiväys

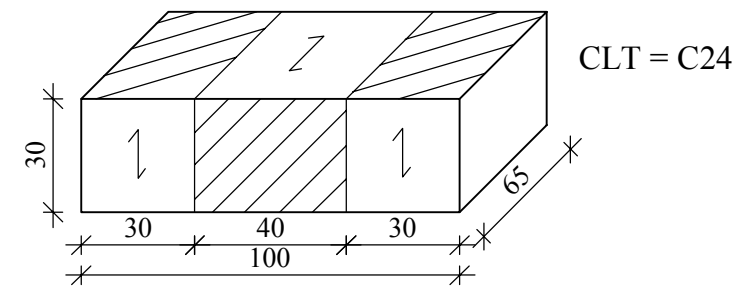
Kaupunginosa / Kylä		Kortteli / Tila	Tontti / Rno	Viranomaisten merkintöjä		
Rakennuksen numero (RATUT) / Rakennusten numerot / Rakennustunnus / Rakennustunnukset						
Rakennustoimenpide LABORATORIOKOE			Piirustuslaji KOEJÄRJESTELY		Juokseva no 1	
Rakennuskohteen nimi ja osoite DIPLOMITYÖ Kitkan hyödyntäminen massiivipuulementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa			Piirustuksen sisältö LIITE 1 Materiaaliparit: 1.LVL-LVL ja 2.LVL-LVL		Mittakaava 1:2	
			Suunnitteluala		Työnumero	Rak. osa
			Päiväys 27.9.2017		Suunnittelija Lauri Vainio	Piirustuksen numero 1
Piirtäjä LV			Tarkastaja		Tiedosto	Muutos



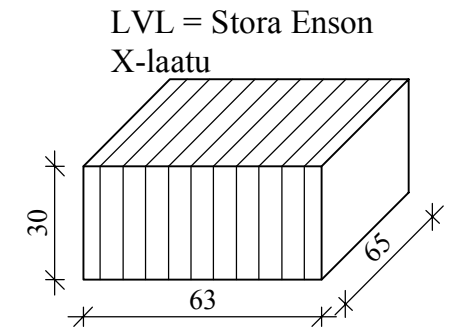
LEIKKAUS A-A



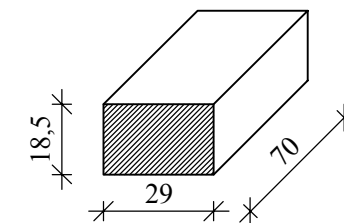
**TYÖNNETTÄVÄ
CLT-KOEKAPPALE**



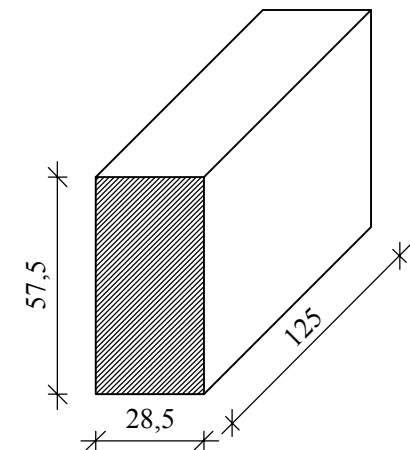
**PAIKALLAAN OLEVA
LVL-KOEKAPPALE**



**TUKIPALA,
TERÄSTÄ (2 kpl)**




**TYÖNTÖPALA,
TERÄSTÄ (1 kpl)**



Tunn Lukum Muutos

Piirt Päiväys

Kaupunginosa / Kylä			Kortteli / Tila	Tontti / Rno	Viranomaisten merkintöjä		
Rakennuksen numero (RATUT) / Rakennusten numerot / Rakennustunnus / Rakennustunnukset							
Rakennustoimenpide LABORATORIOKOE				Piirustuslaji KOEJÄRJESTELY		Juokseva no 2	
Rakennuskohteen nimi ja osoite DIPLOMITYÖ Kitkan hyödyntäminen massiivipuulementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa				Piirustuksen sisältö LIITE 1 Materiaaliparit: 3.CLT-LVL ja 4.CLT-LVL		Mittakaava 1:2	
				Suunnitteluala		Työnumero	Rak. osa
				Piirustuksen numero		Tiedosto	Muutos
Päiväys 27.9.2017		Suunnittelija Lauri Vainio		2			
Piirtäjä LV		Tarkastaja					

Työntökoneen mäntä

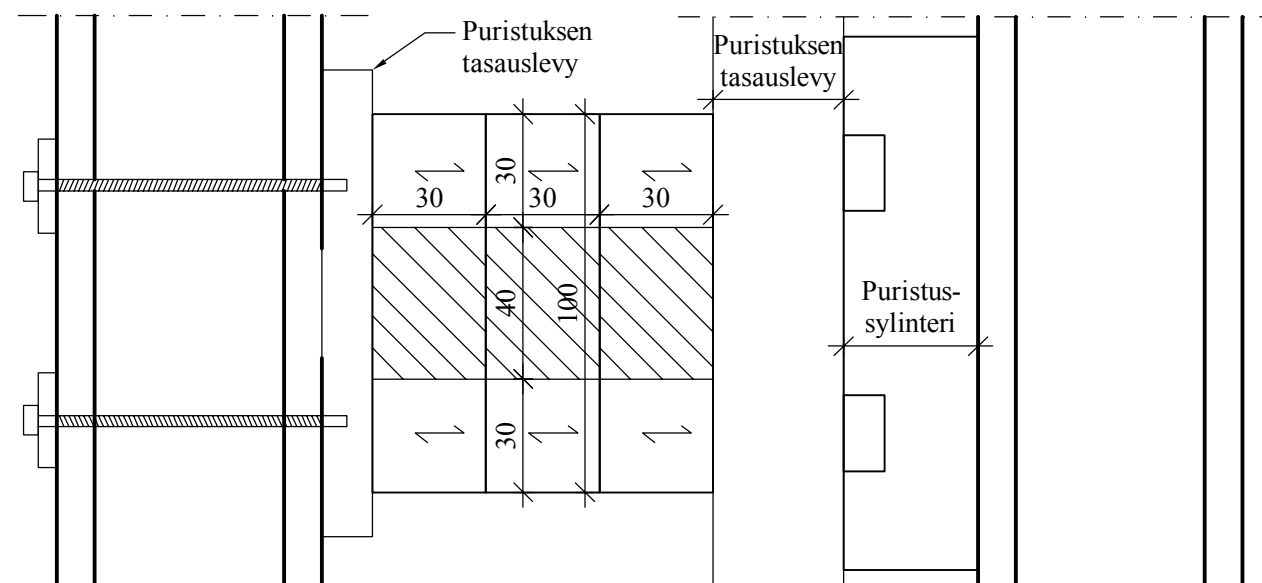
LVL työntöpala

Puristuksen
tasauslevyPuristus
adinteri

Puristuksen —
tasauslevy
Tukipala b=29 mm

Väli
8,5 mm

– Tukipalan ja koekappaleen välissä vaakamitta 1...2 mm


LEIKKAUS A-A

A 3D diagram of a rectangular prism. The front face is divided into three vertical sections. The left and right sections are white and each contains a downward-pointing arrow labeled '1'. The middle section is shaded with diagonal lines and contains a downward-pointing arrow labeled '2'. The top face is divided into three corresponding sections, with the middle section containing a downward-pointing arrow labeled '3'. Dimensions are indicated: the height is 30, the width is 65, and the length is divided into segments of 30, 40, and 30, with a total length of 100 indicated below.

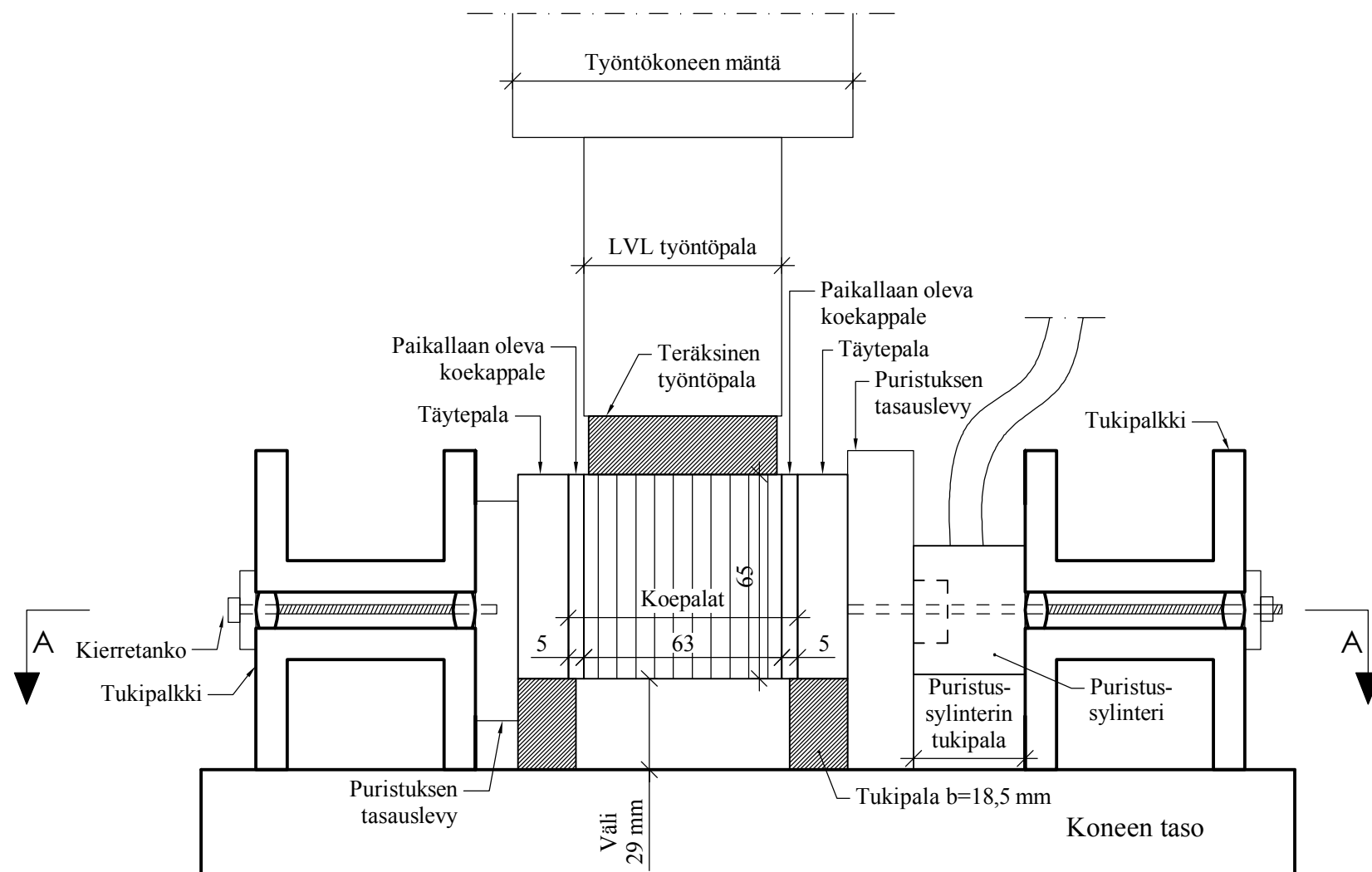
A 3D diagram of a rectangular prism. The front face is shaded with diagonal lines. The dimensions are labeled: the width of the front face is 29, the height of the front face is 10, and the length of the prism is 110.

A 3D diagram of a rectangular prism. The front face is shaded with diagonal lines. The dimensions are labeled: the width of the front face is 28,5, the height of the front face is 57,5, and the length of the prism is 125.

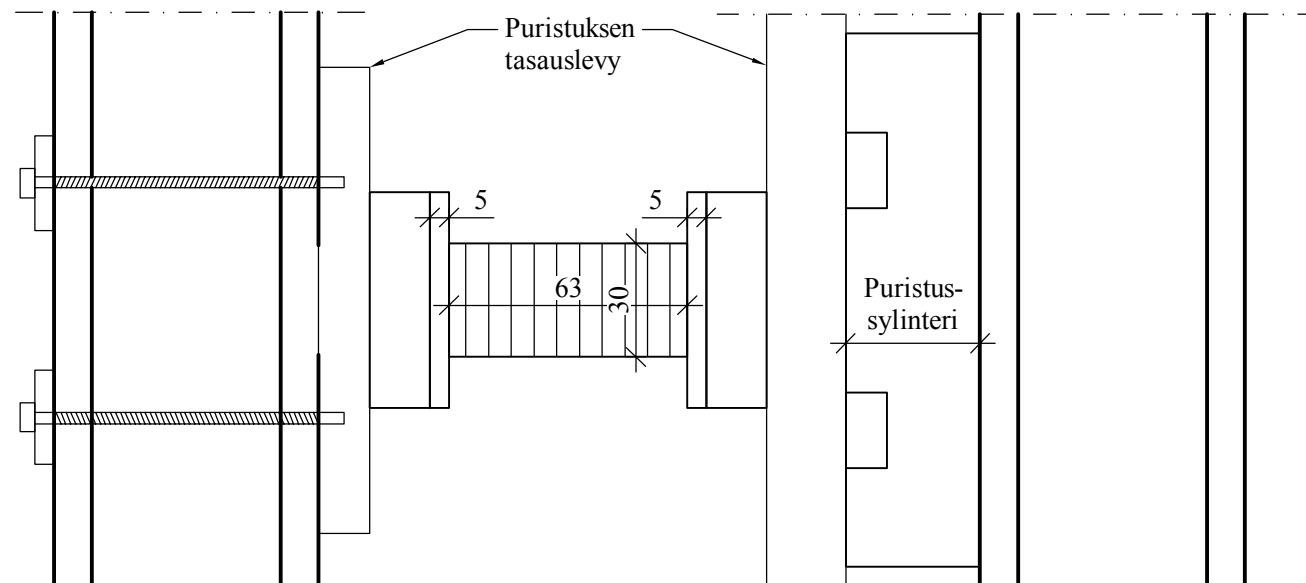
Piirt	Päiväys
-------	---------

Kaupunginosa / Kylä		Kortteli / Tila	Tontti / Rno	Viranomaisten merkintöjä
Rakennuksen numero (RATUT) / Rakennusten numerot / Rakennustunnus / Rakennustunnukset				
Rakennustoimenpide LABORATORIOKOE		Piirustuslaji KOEJÄRJESTELY		Juokseva no 3
Rakennuskohteen nimi ja osoite DIPLOMITYÖ Kitkan hyödyntäminen massiivipuulementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa		Piirustuksen sisältö LIITE 1 Materiaalipari: 5.CLT-CLT		Mittakaava 1:2
		Suunnitteluala	Työnumero	Rak. osa
Päiväys 27.9.2017	Suunnittelija Lauri Vainio	Piirustuksen numero	Tiedosto	Muutos
Piirtäjä LV	Tarkastaja	3		

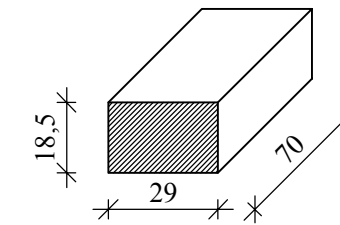
KOEJÄRJESTELY SIVUSTA



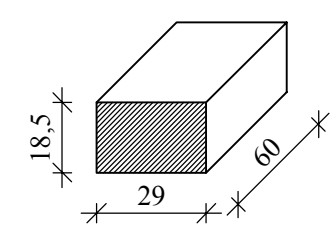
LEIKKAUS A-A



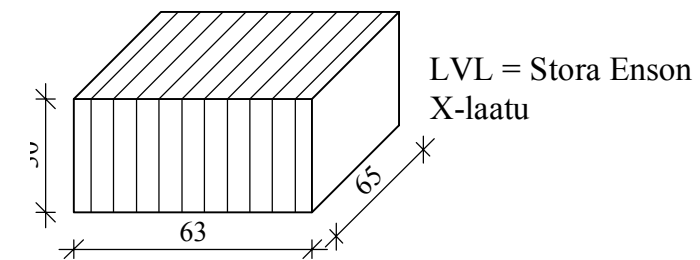
TUKIPALA, TERÄSTÄ (2 kpl)



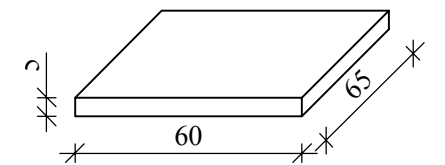
TYÖNTÖPALA, TERÄSTÄ (1 kpl)



TYÖNNETTÄVÄ LVL-KOEKAPPALE



PAIKALLAAN OLEVA TERÄSKAPPALE

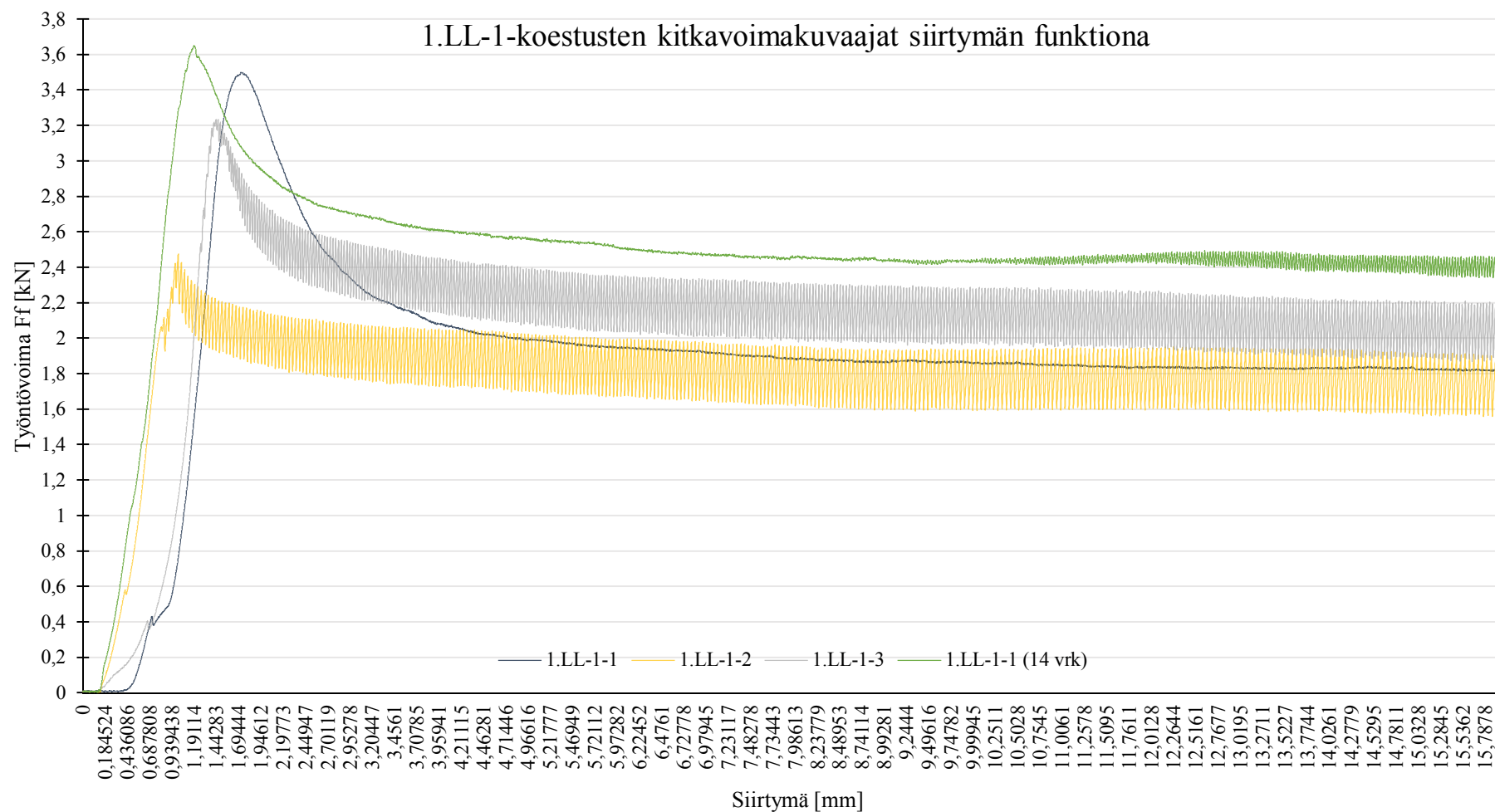


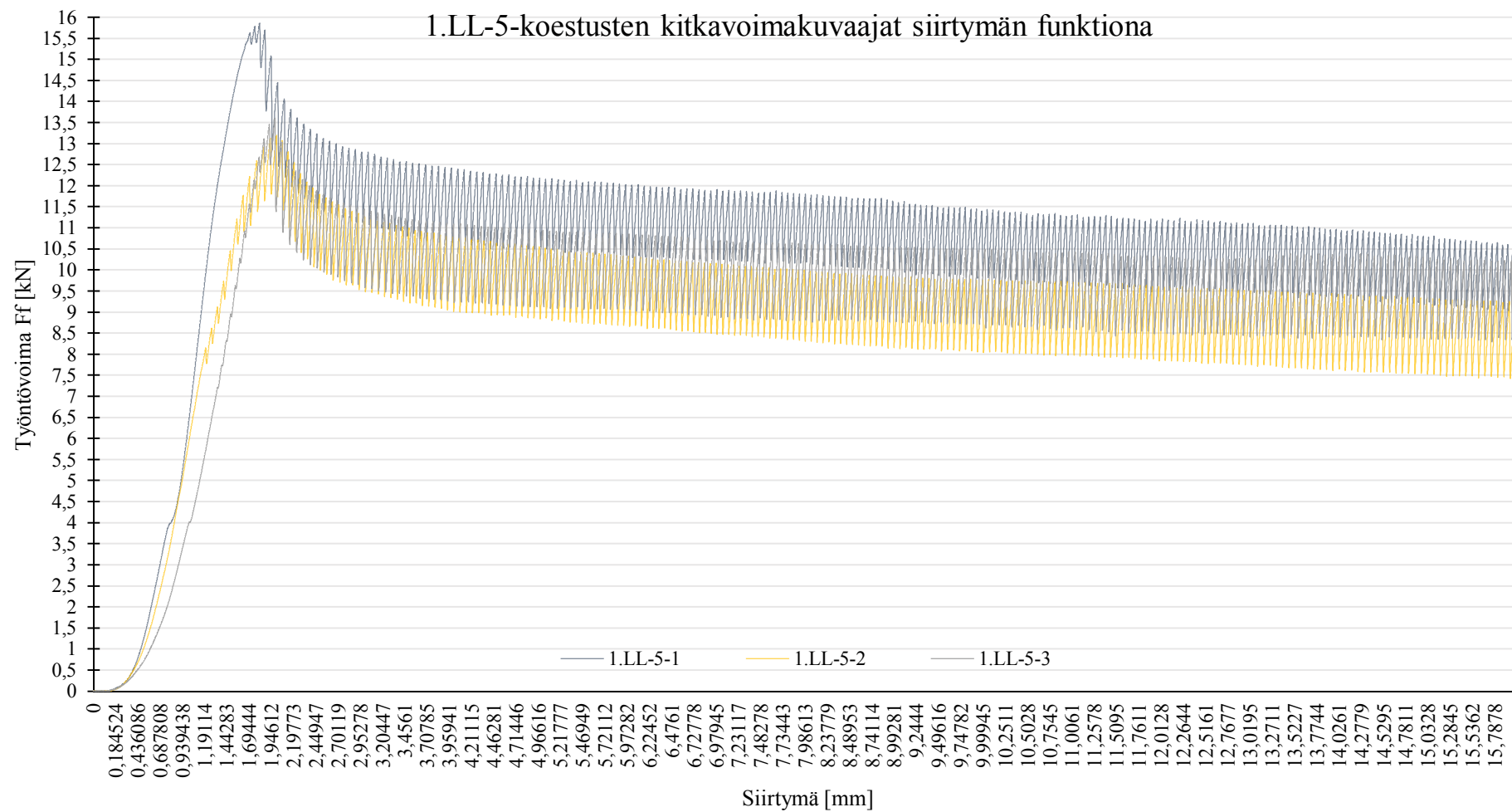
Tunn Lukum Muutos

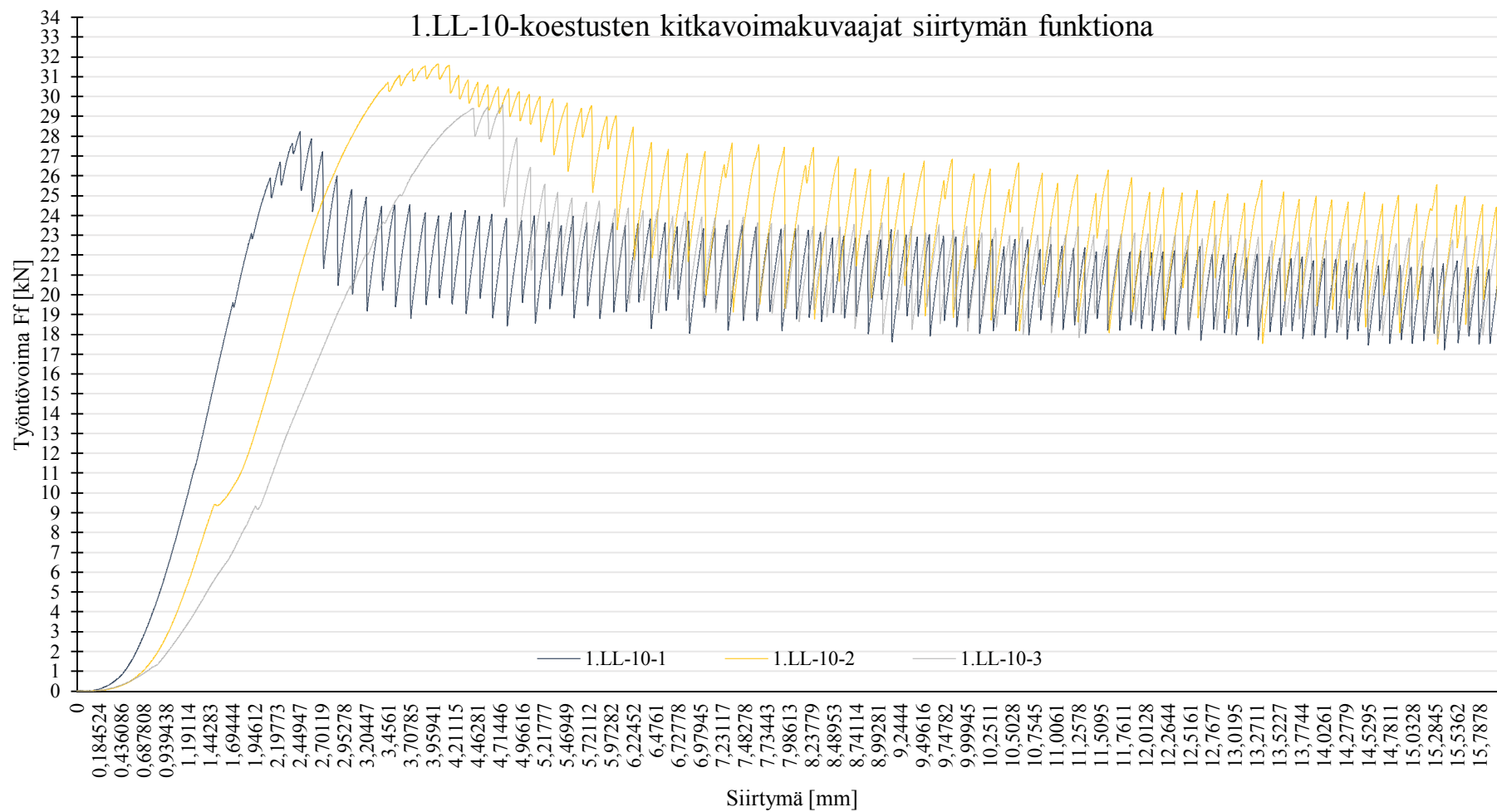
Piirt Päiväys

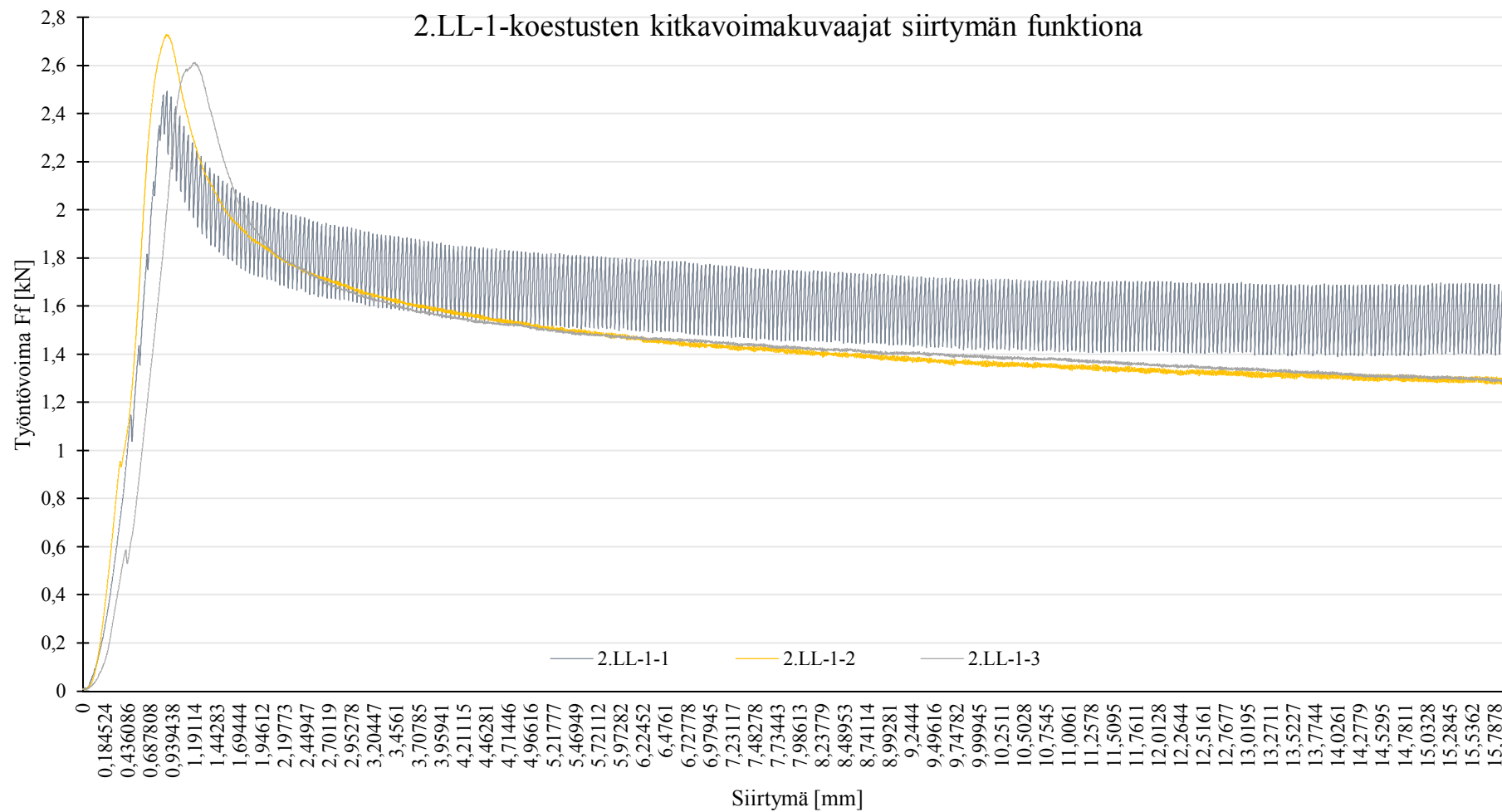
Kaupunginosa / Kylä		Kortteli / Tila	Tontti / Rno	Viranomaisten merkintöjä		
Rakennuksen numero (RATUT) / Rakennusten numerot / Rakennustunnus / Rakennustunnukset						
Rakennustoimenpide LABORATORIOKOE			Piirustuslaji KOEJÄRJESTELY		Juokseva no 4	
Rakennuskohteen nimi ja osoite DIPLOMITYÖ Kitkan hyödyntäminen massiivipuulementeistä tehtyjen kantavien seinien vaakaliitoksissa			Piirustuksen sisältö LIITE 1 Materiaalipari: 6.LVL-teräs		Mittakaava 1:2	
			Suunnitteluala		Työnumero	Rak. osa
			Päiväys 27.9.2017		Suunnittelija Lauri Vainio	Piirustuksen numero
Piirtäjä LV			4			

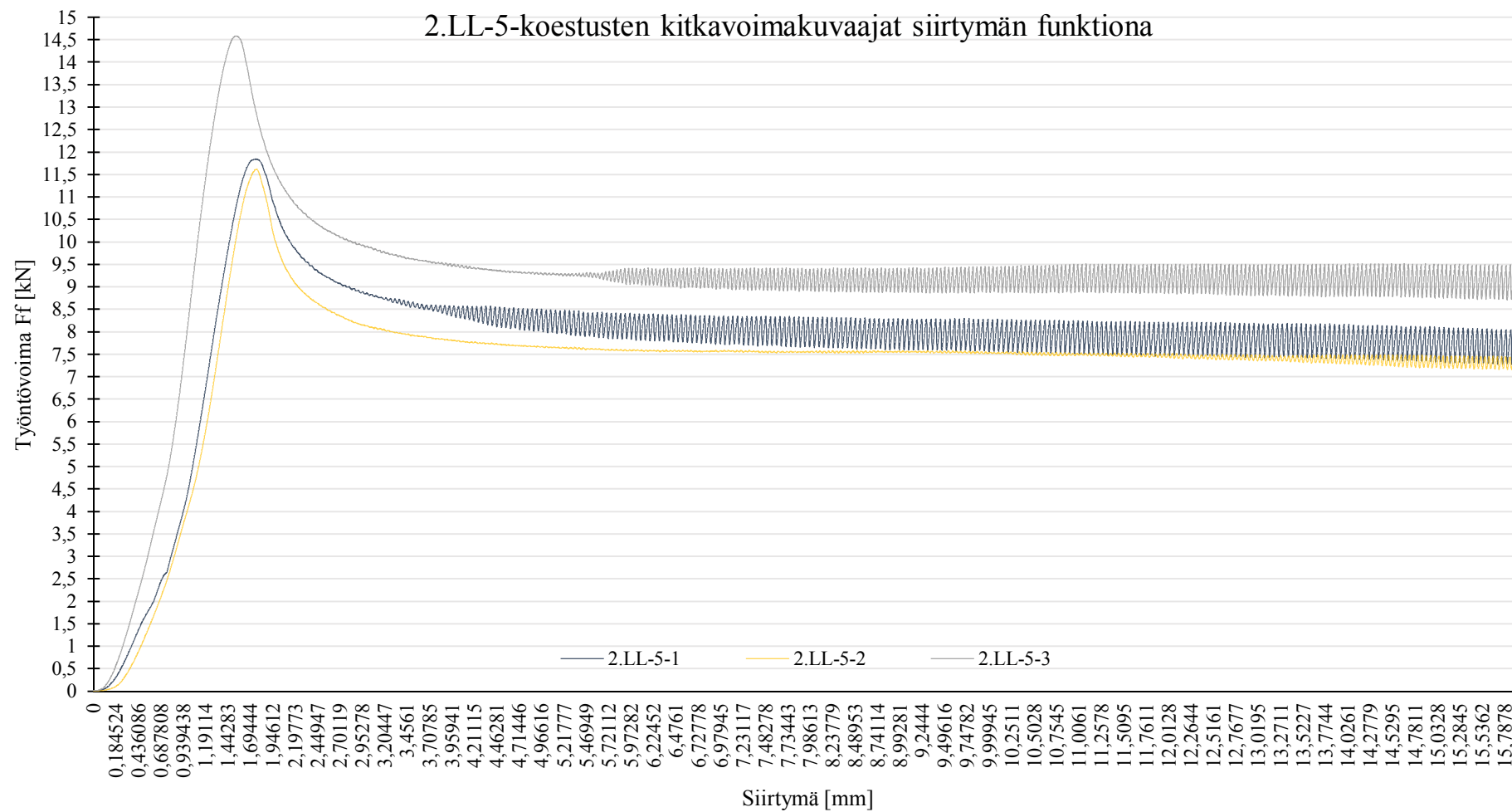
Liite 2. Koekappaleiden työntövoima-siirtymä-kuvaajat

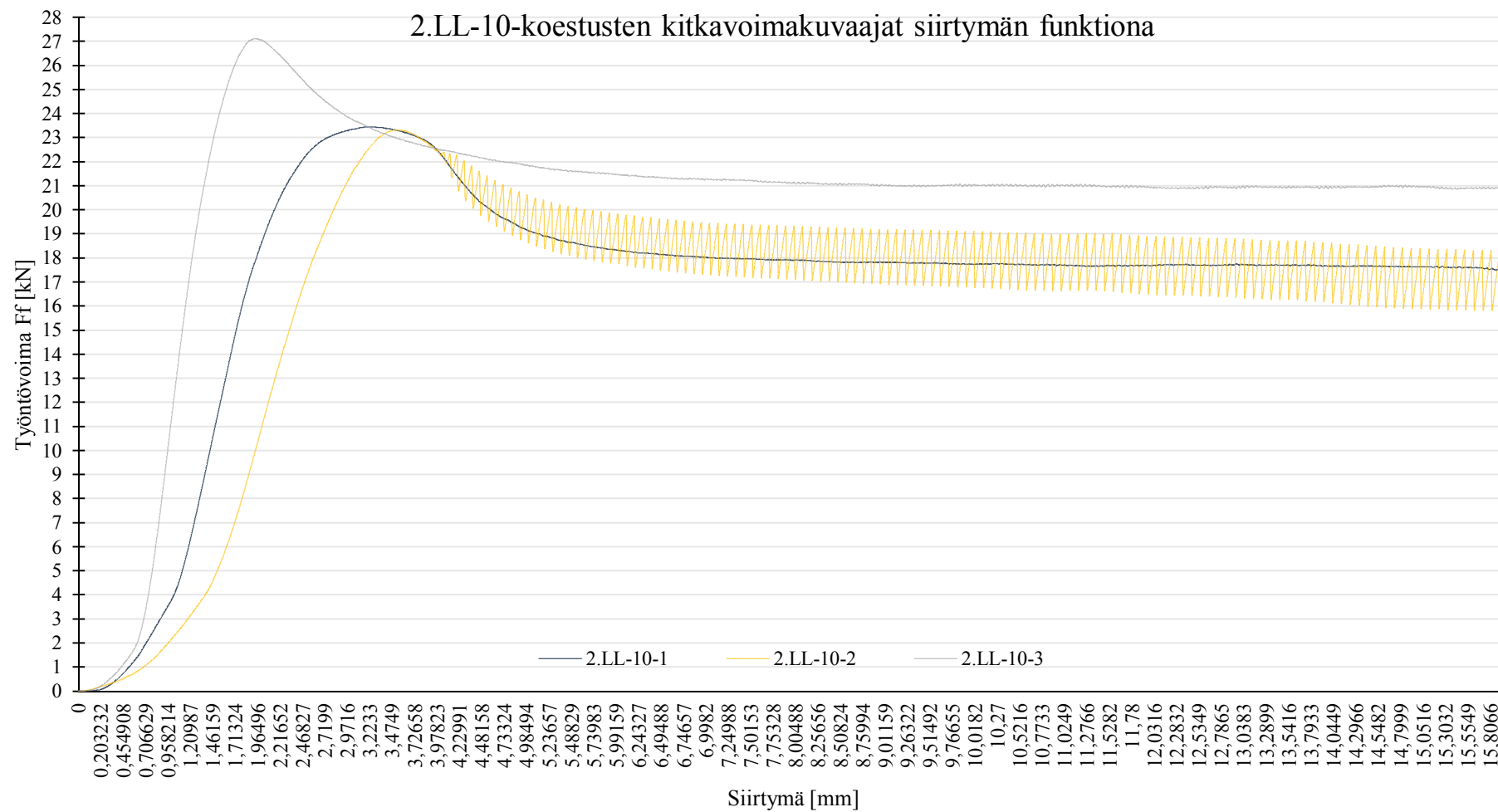




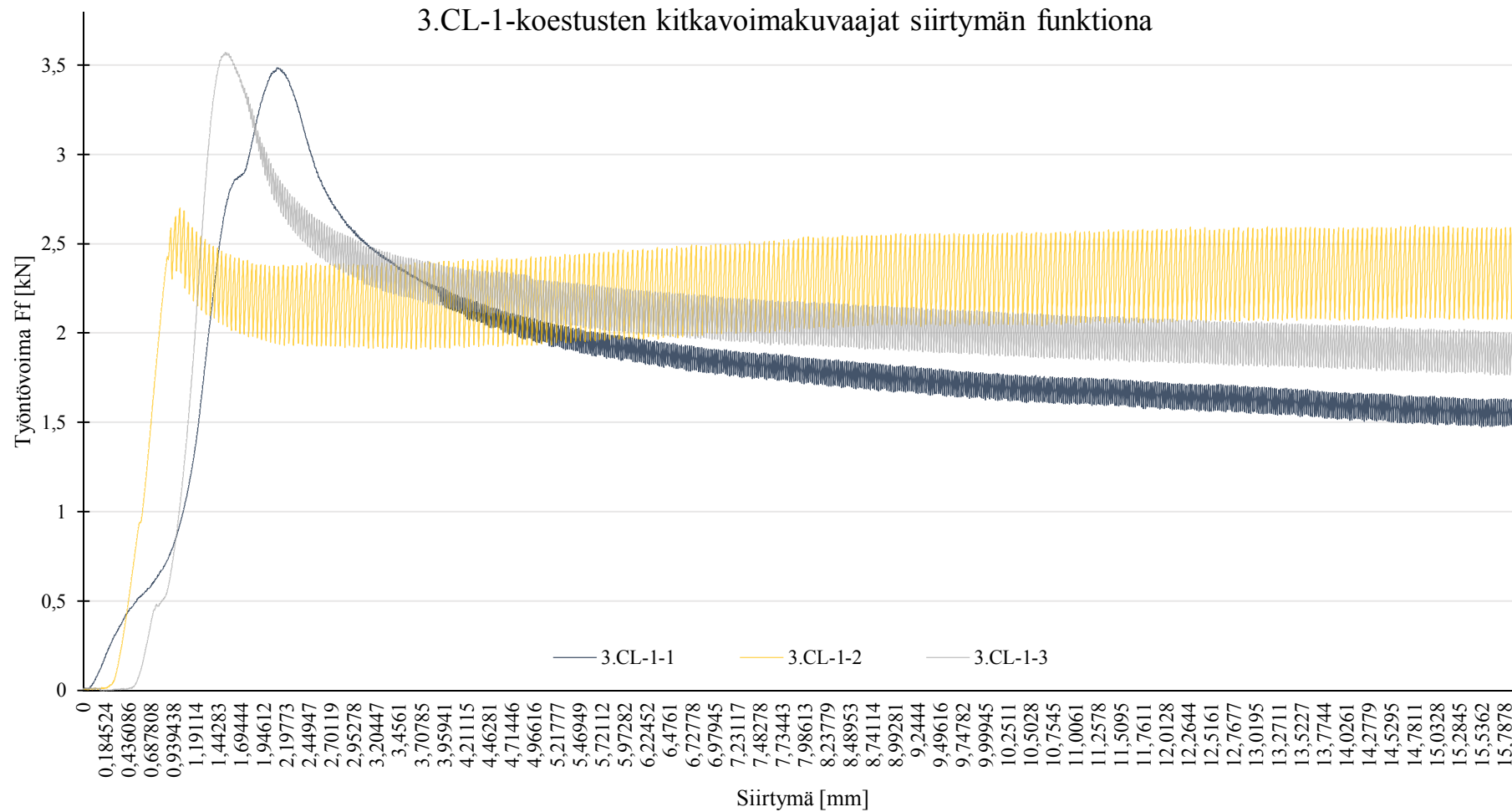


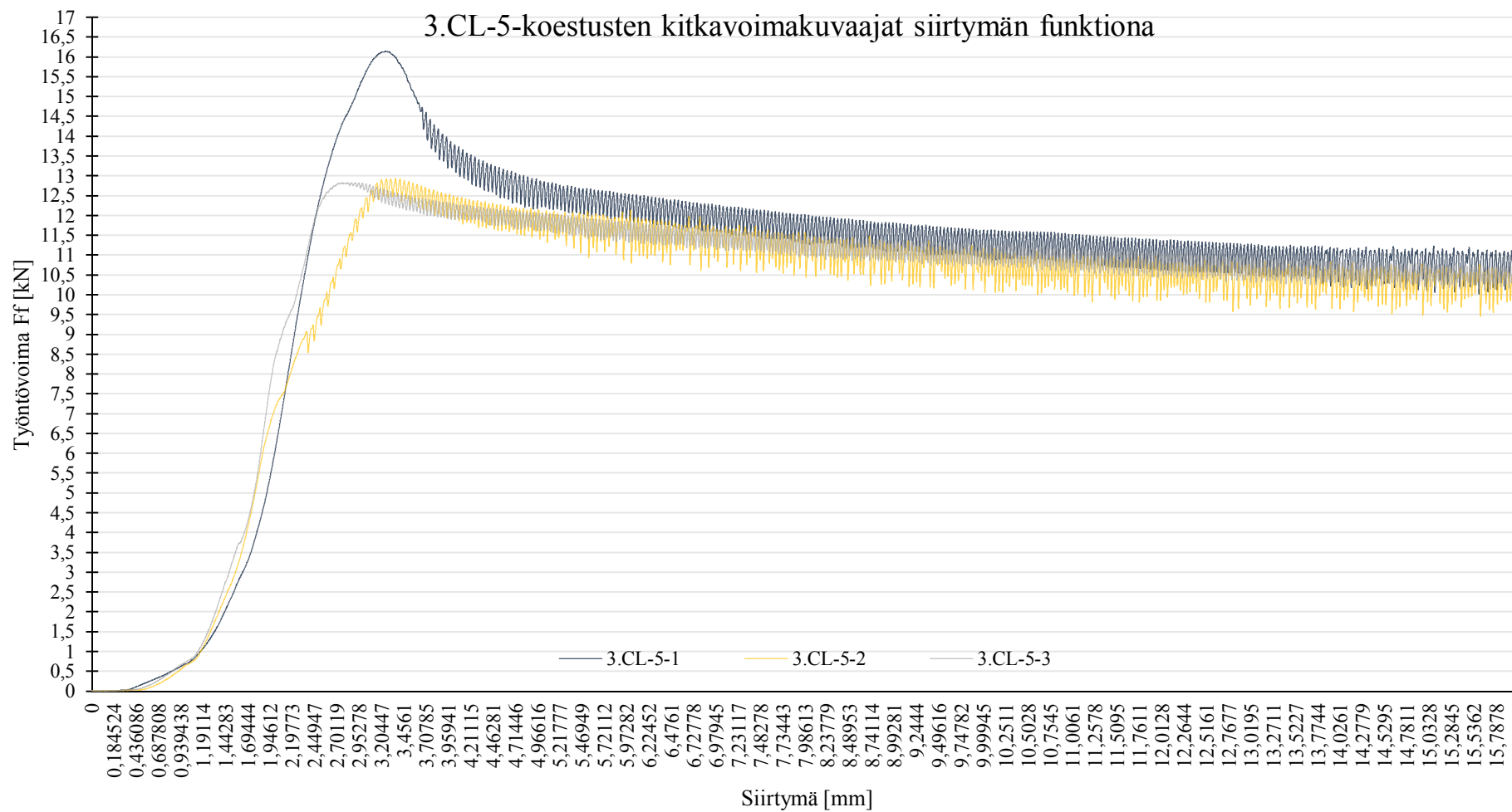


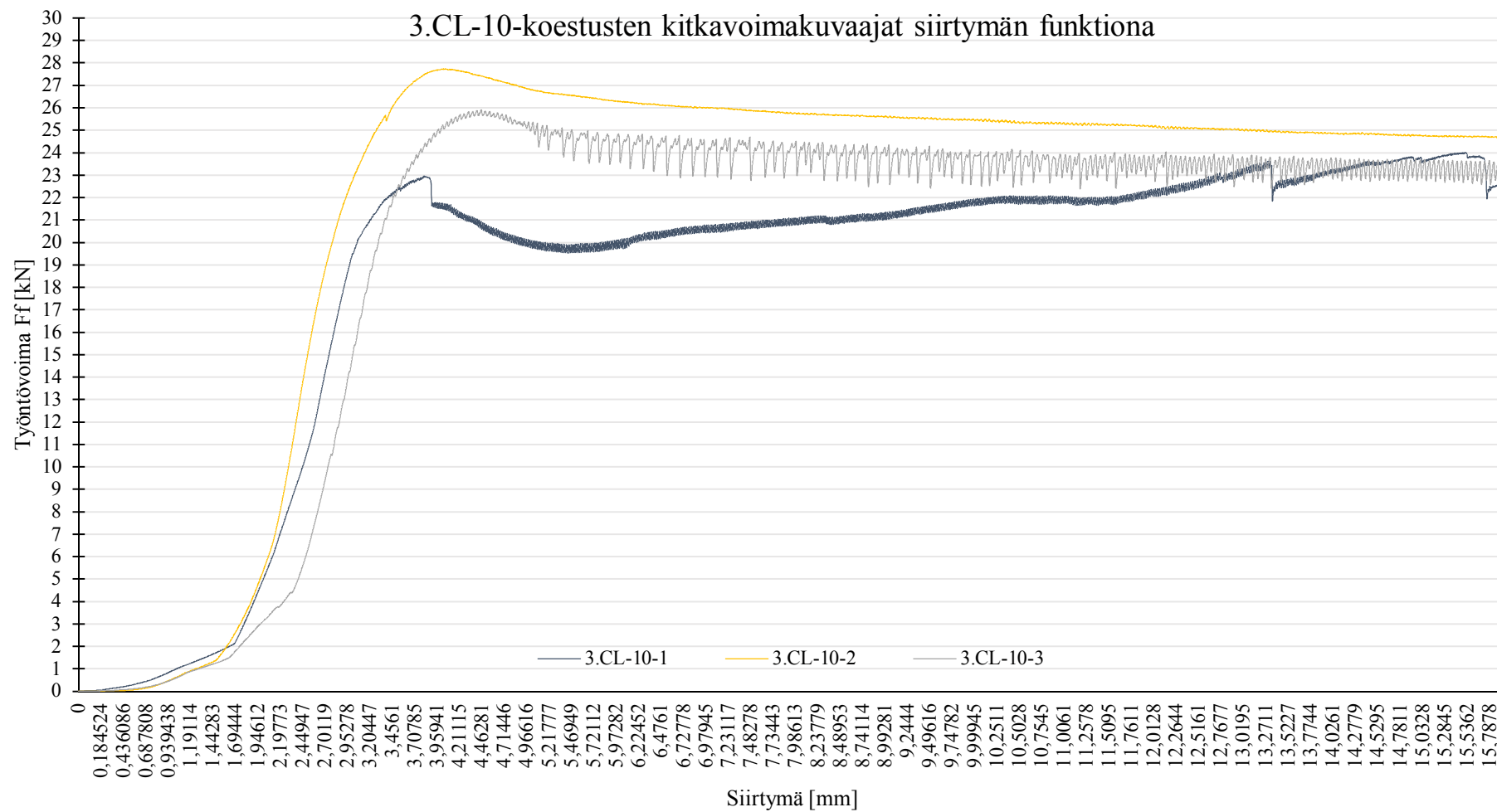




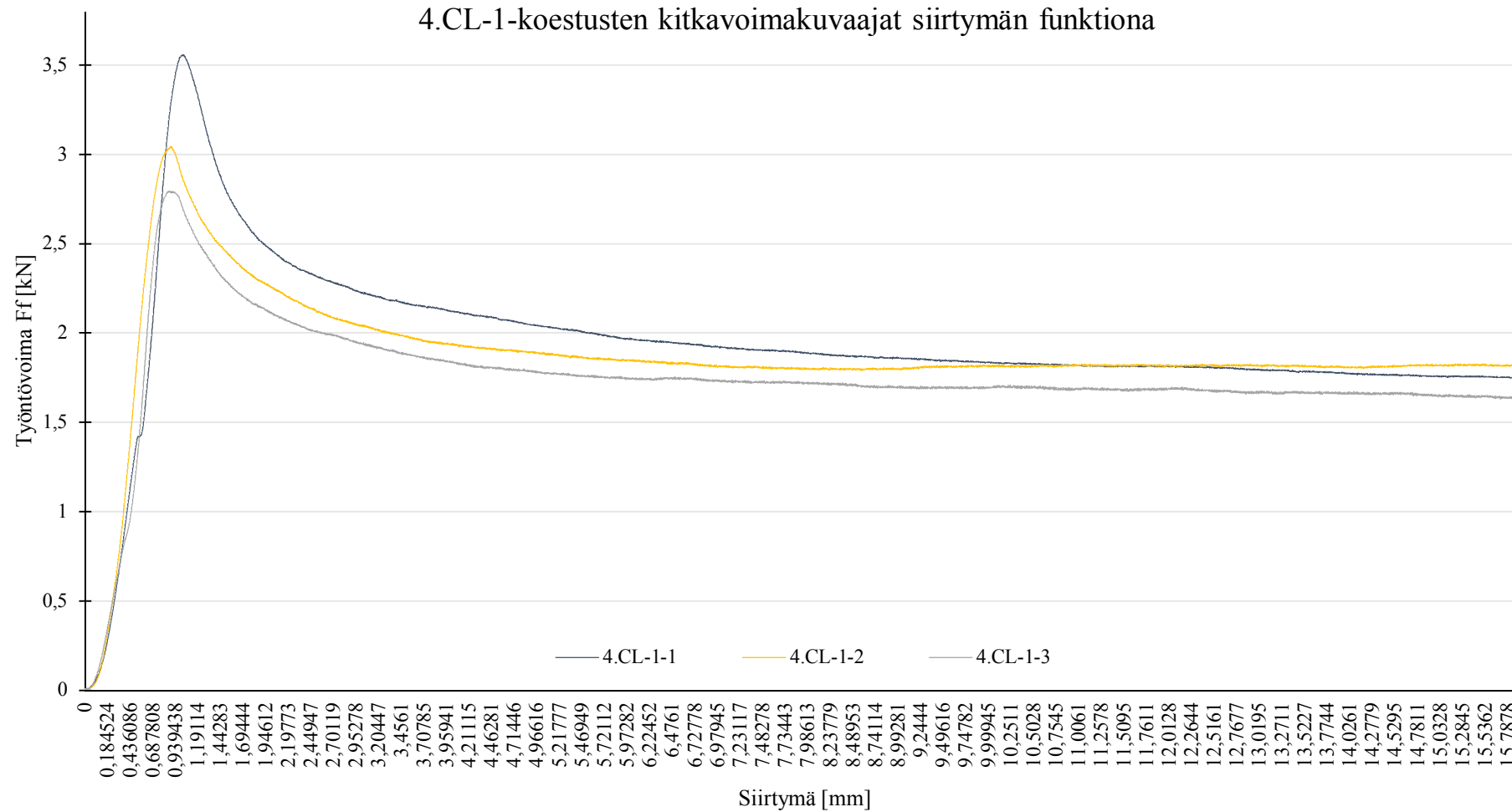
3.CL-1-koestusten kitkavoimakuvajat siirtymän funktiona

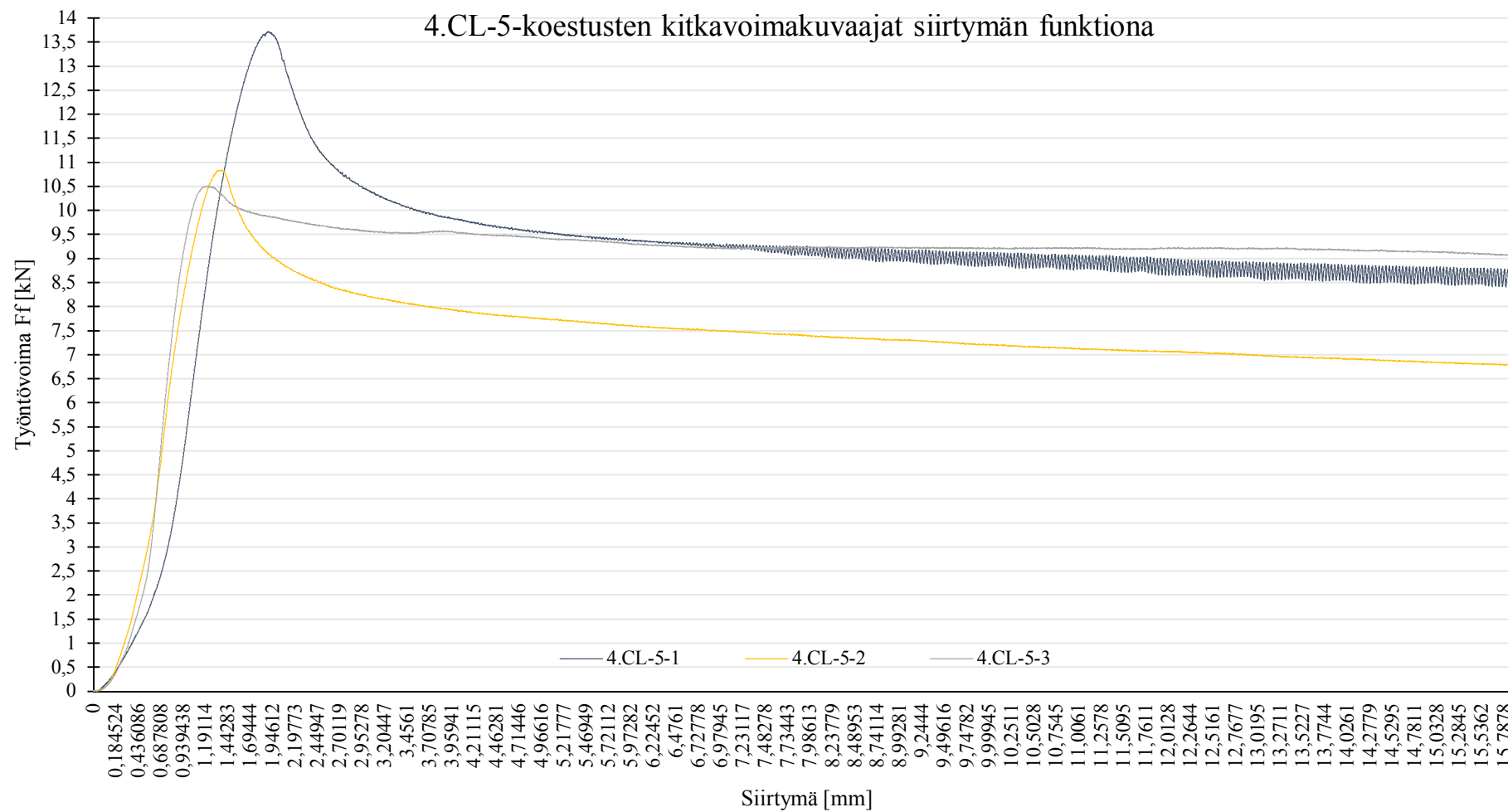


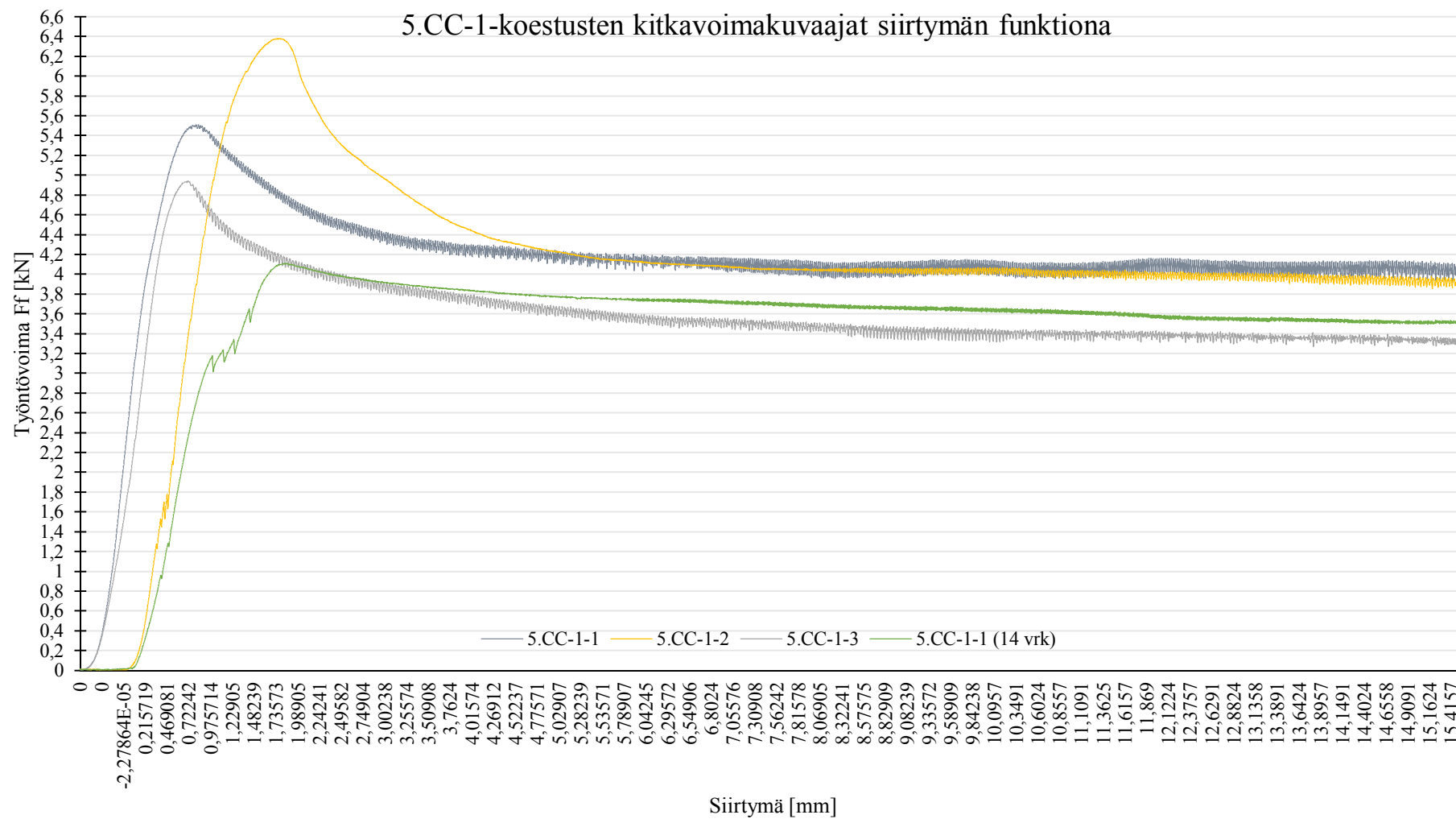


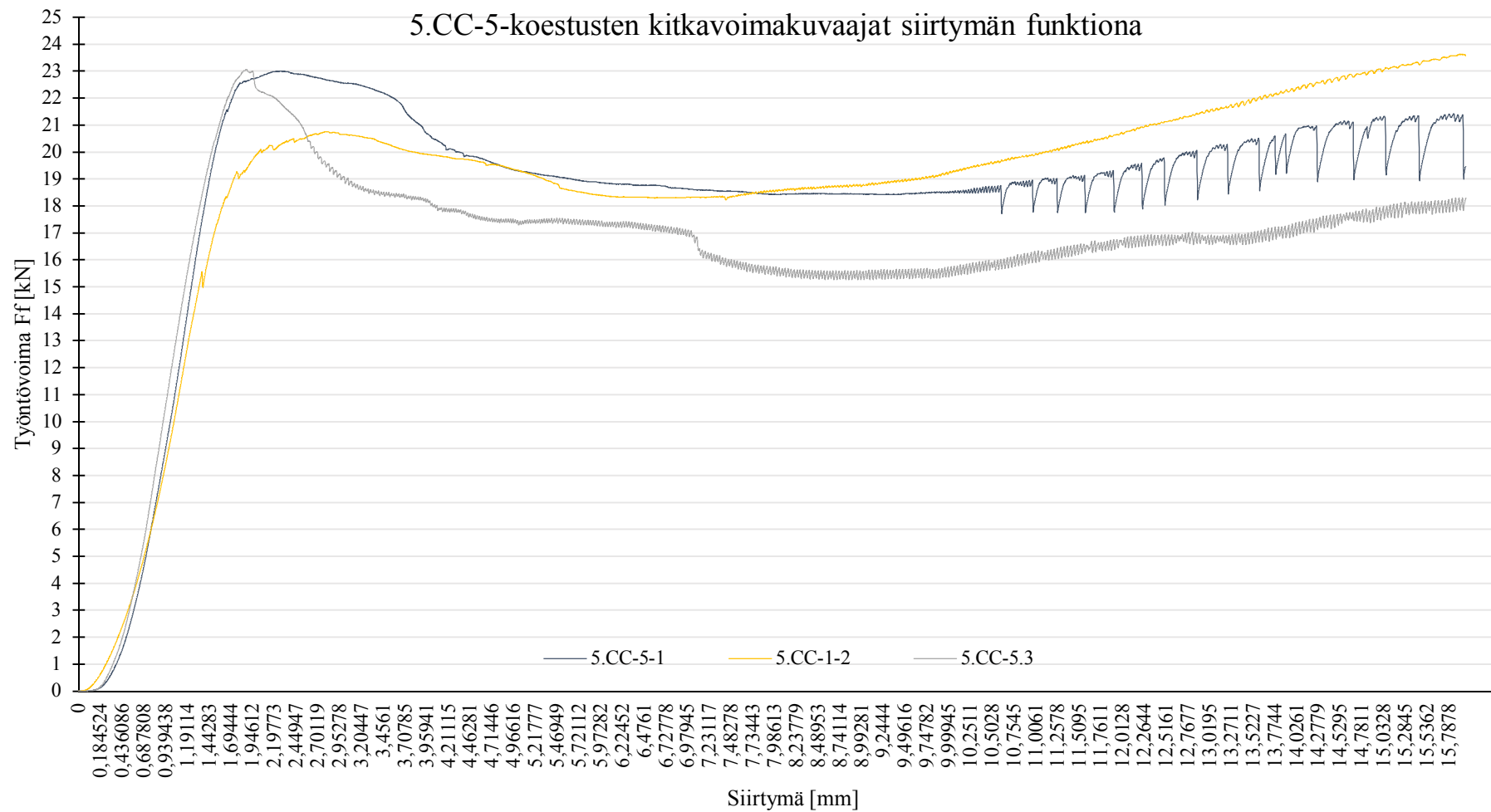


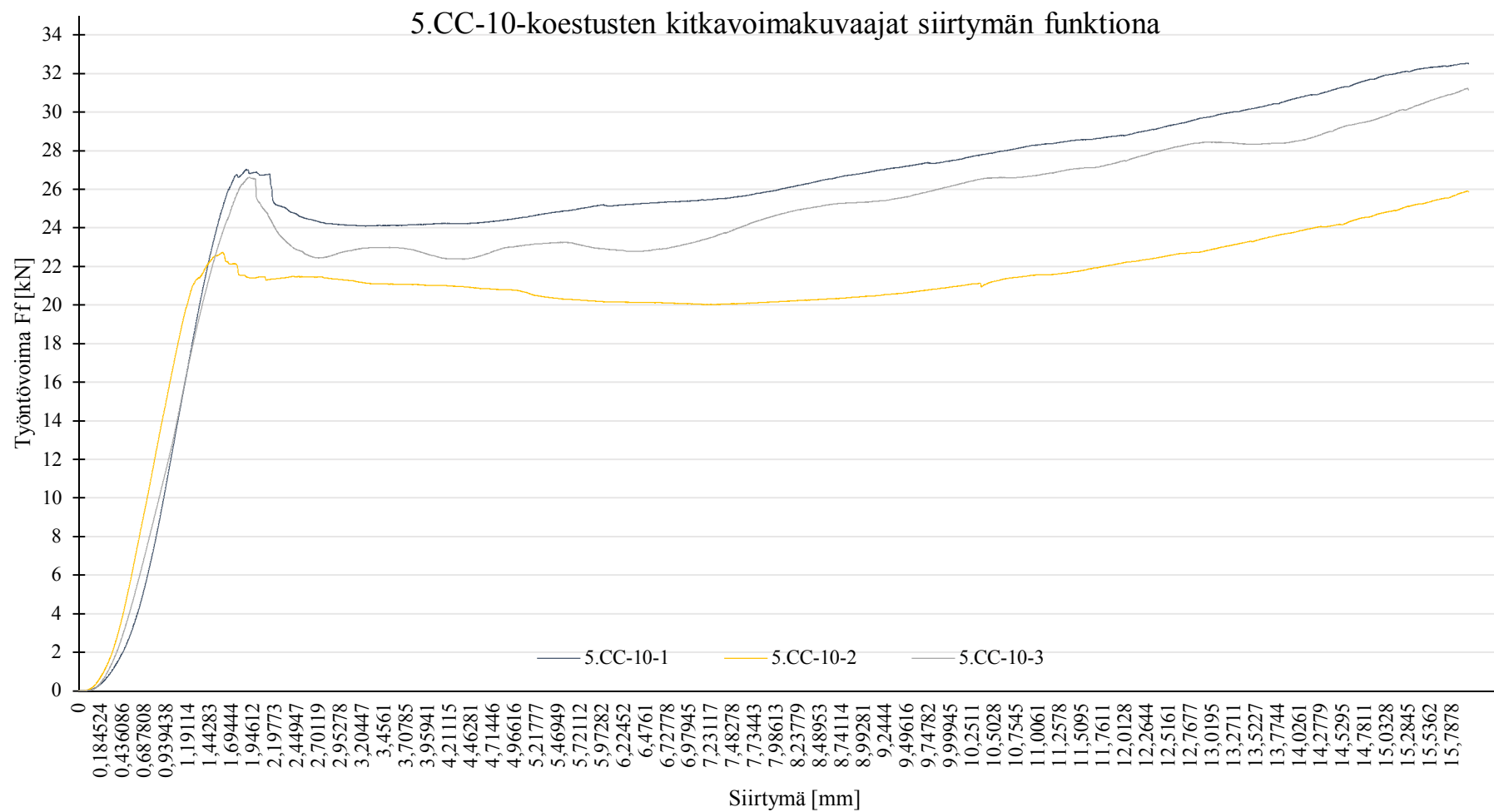
4.CL-1-koestusten kitkavoimakuvajaat siirtymän funktiona

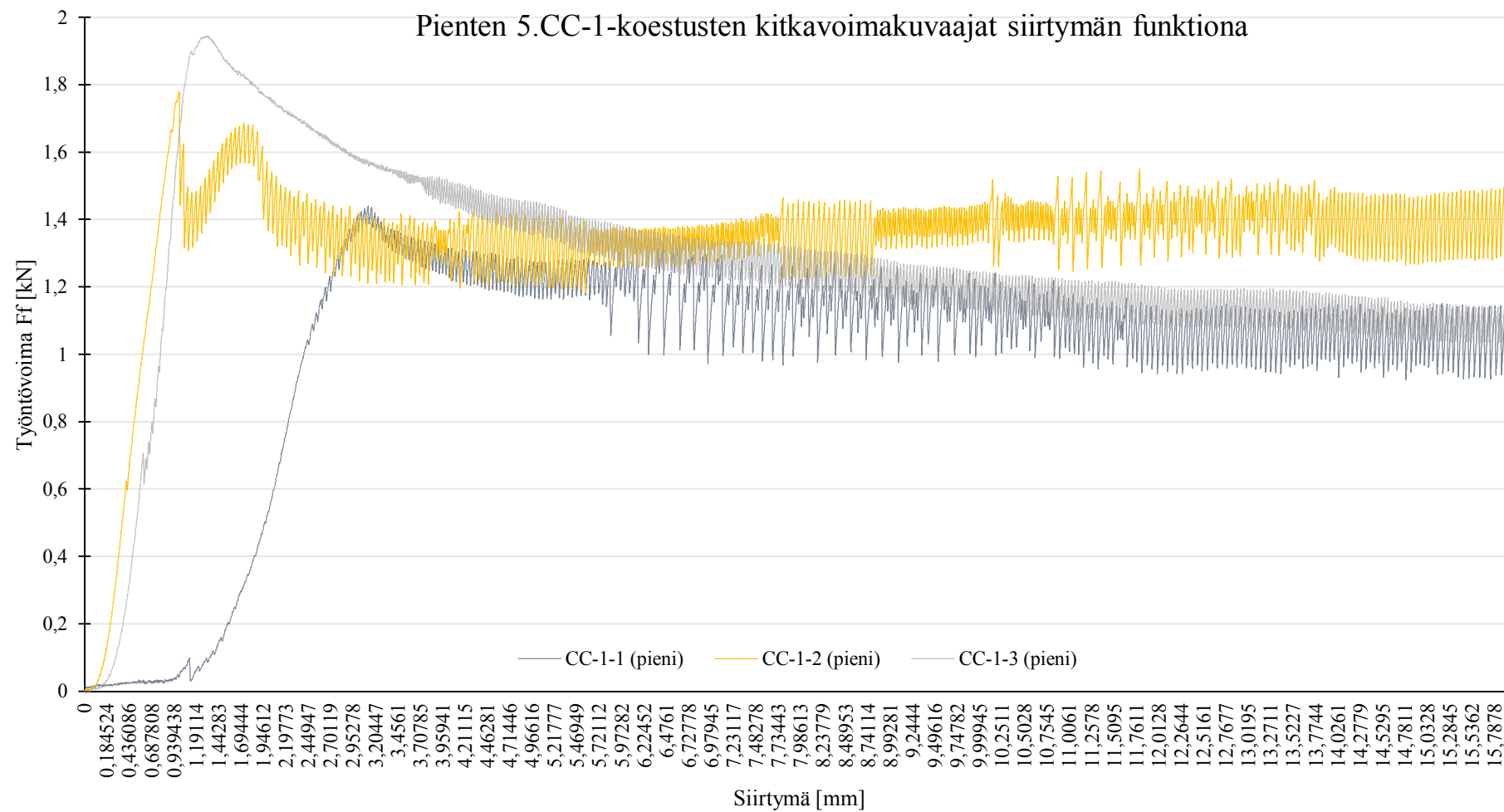


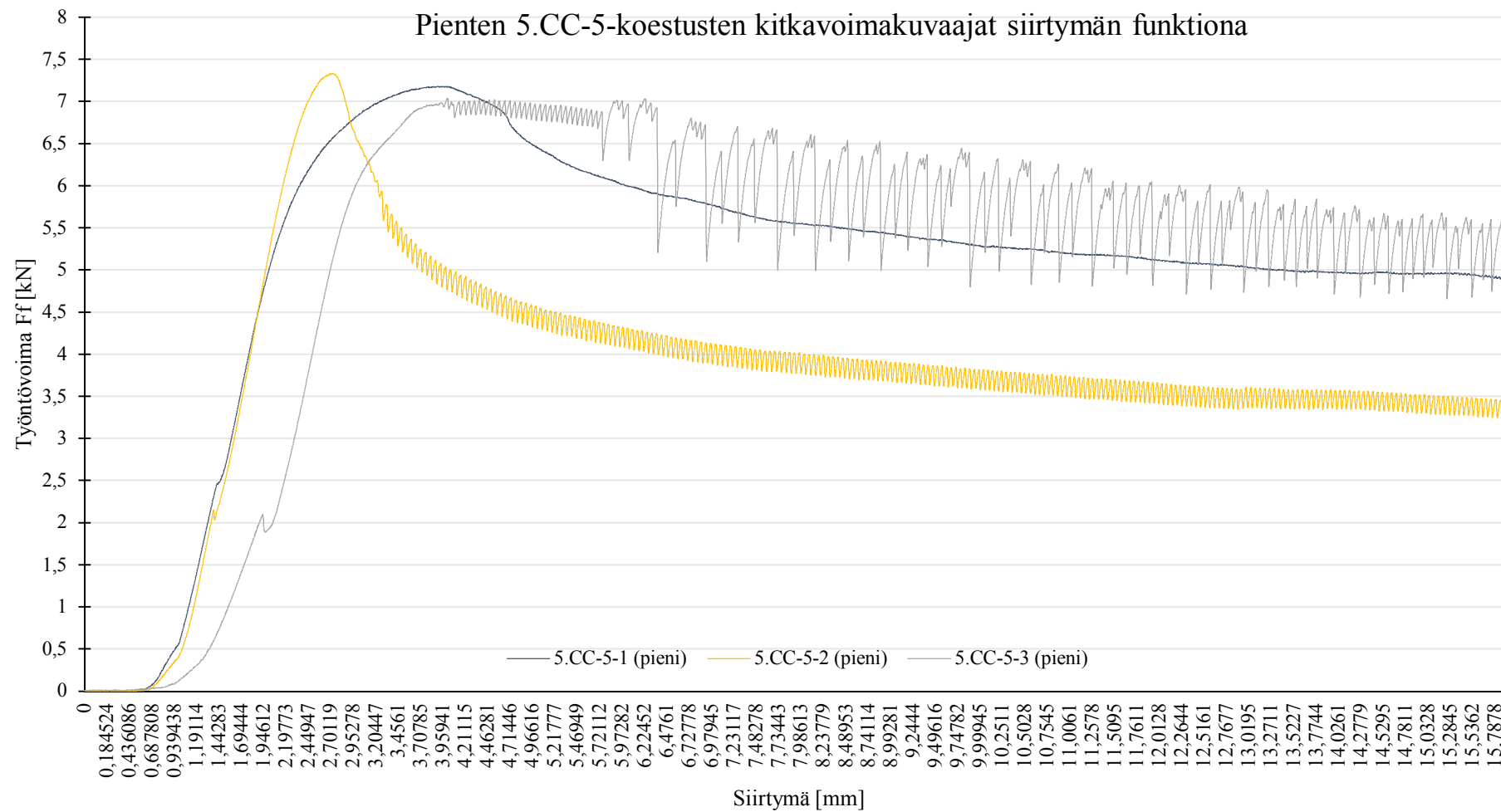


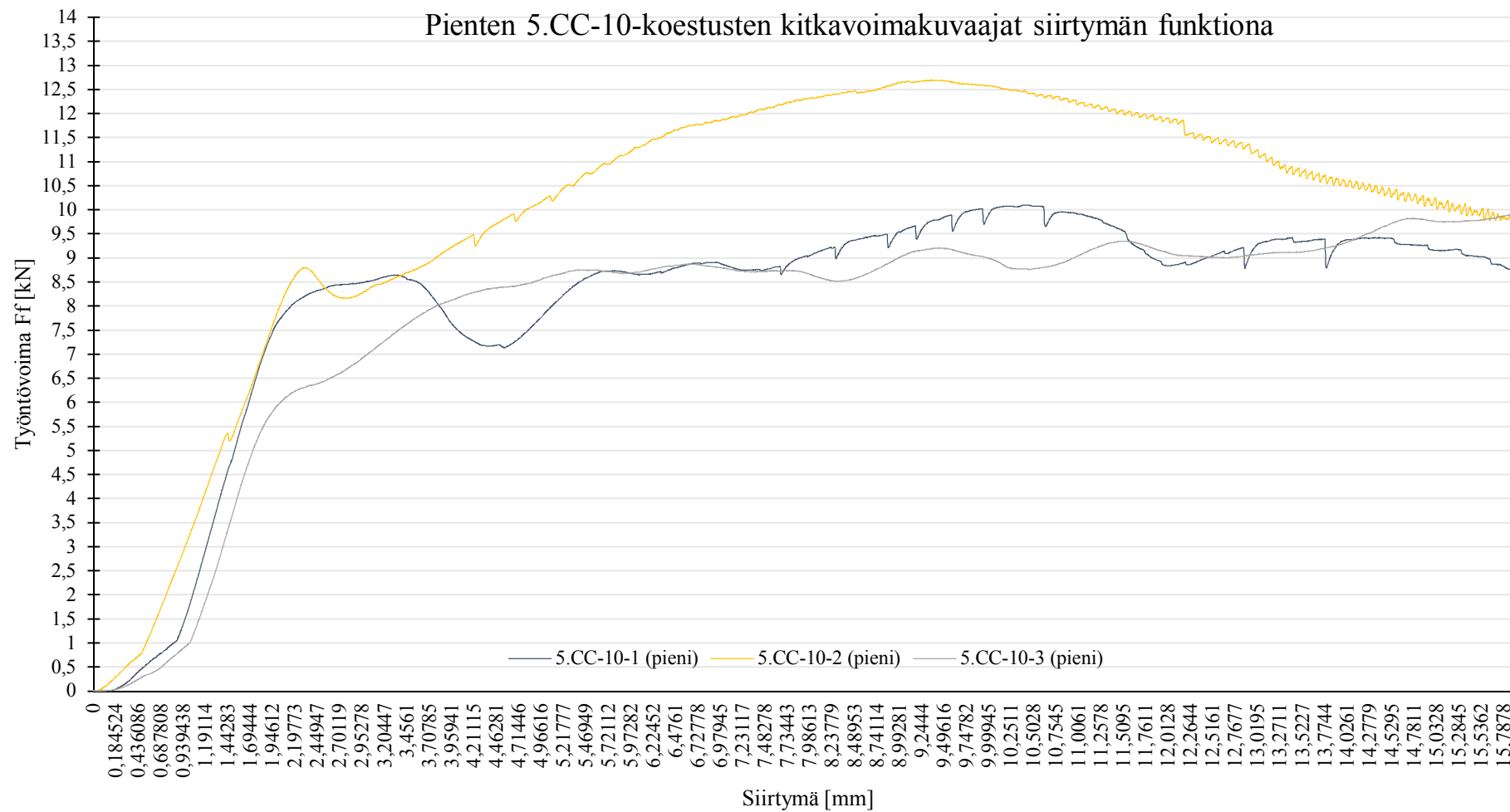


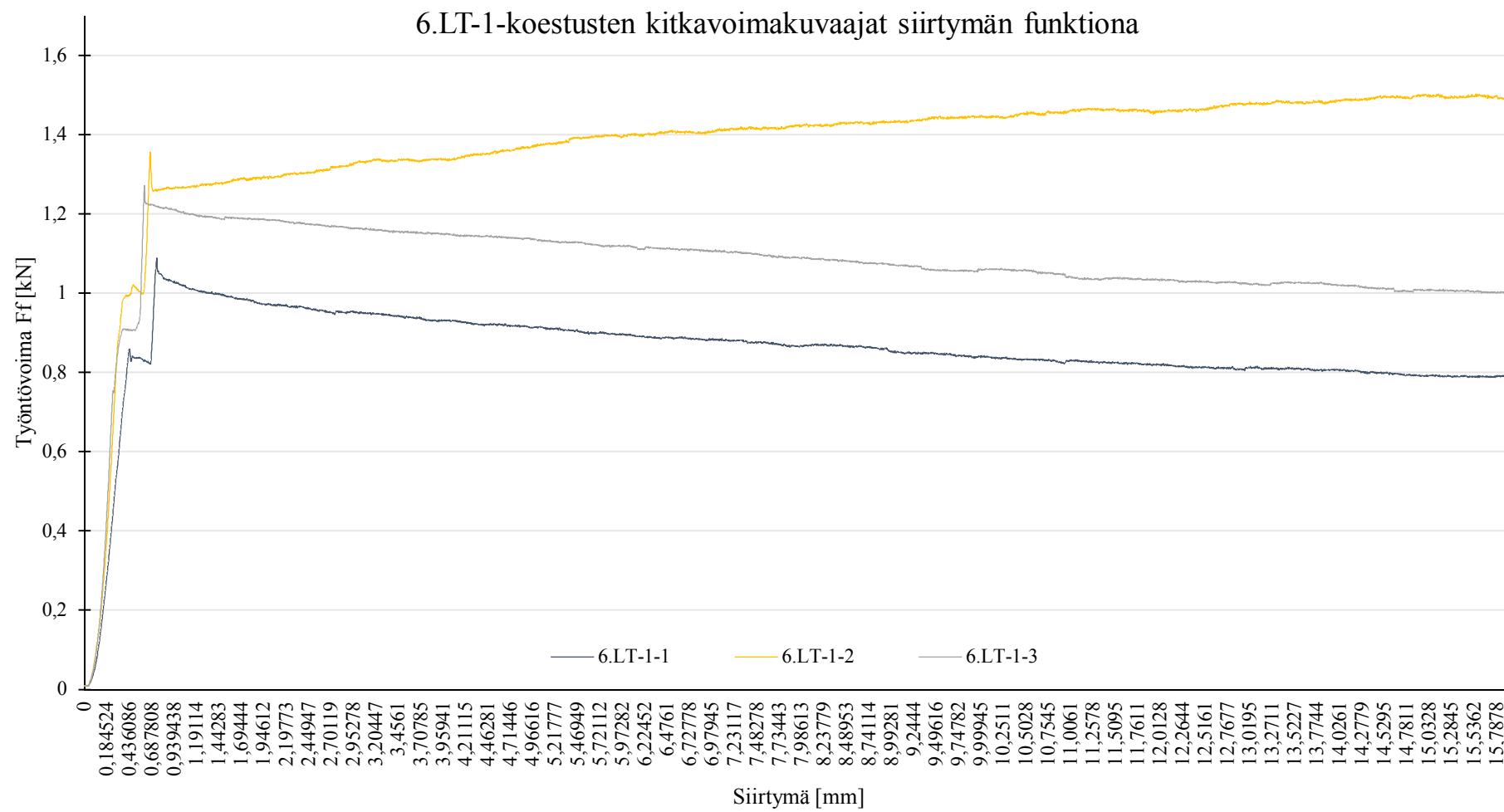


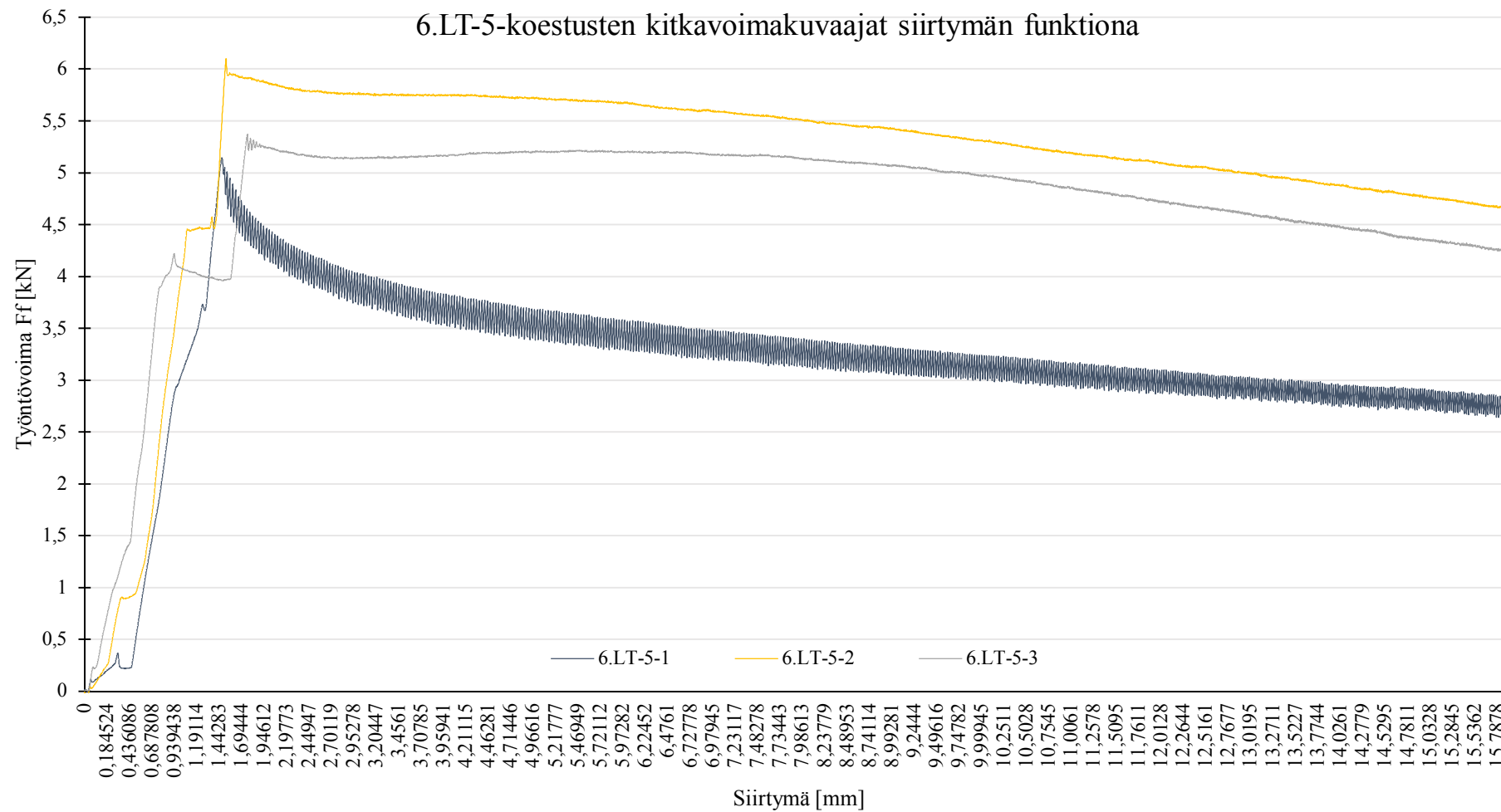


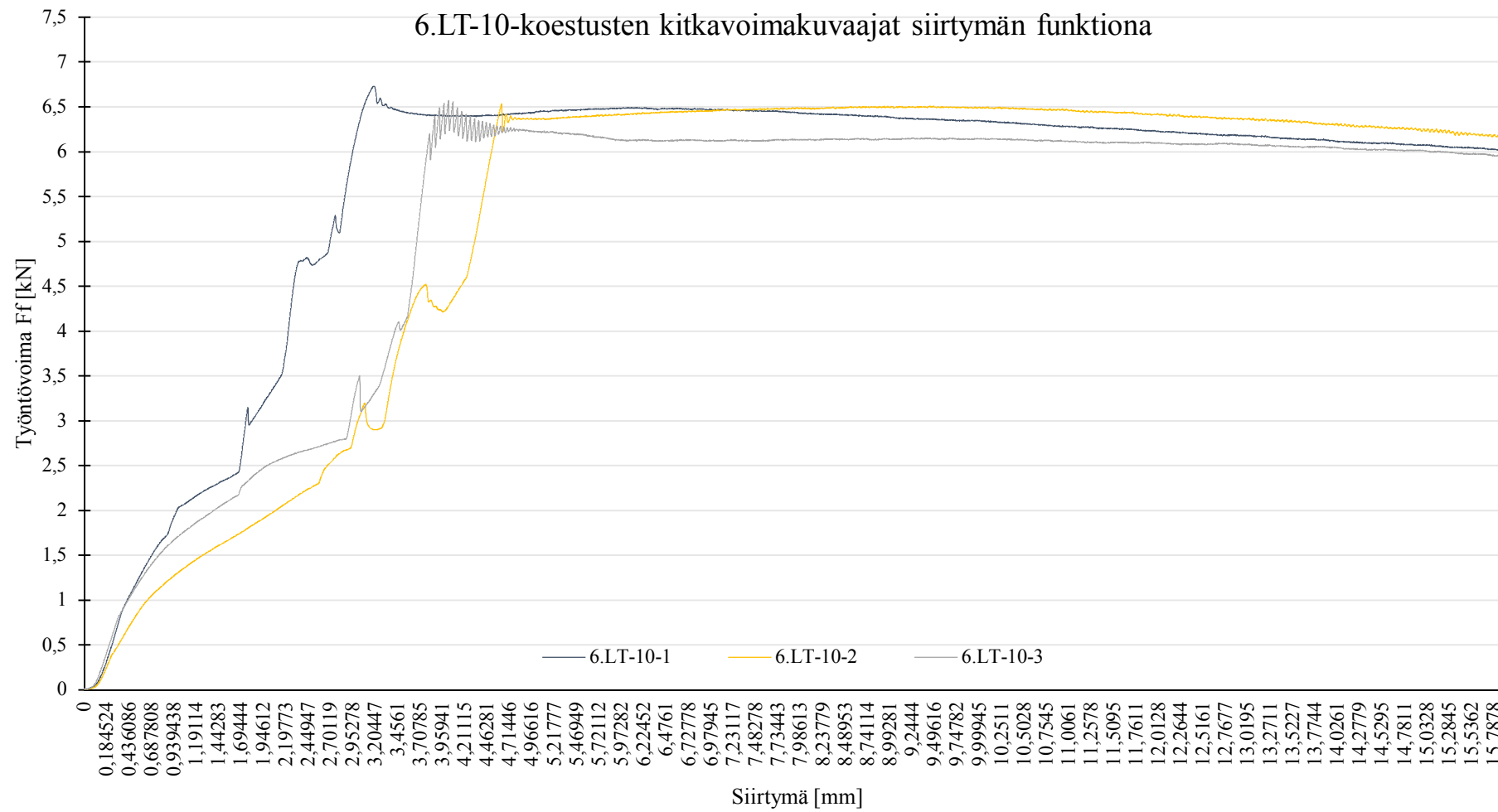












Liite 3. CLT-koekappaleiden laskennalliset leikkausmurtovoimat

CLT-koekappaleen leikkauspinnan poikkileikkausarvot

$$b_{CLT} := 65 \text{ mm} \quad h_{CLT} := 30 \text{ mm}$$

Murtomekanismi 1: Lamellikerrosten lautojen leikkausvoima rolling shear -lujuudella

Poikittaisen kerroksen tasoleikkauslujuuden eli rolling shear -lujuuden ominaisarvo CLT:lle

$$f_{R,k} := 1.25 \frac{N}{mm^2}$$

Yhden lamellikerroksen lautojen poikkipinta-ala

$$A_{S.net} := b_{CLT} \cdot h_{CLT} \square 1950 \text{ mm}^2$$

Suurin mahdollinen leikkausvoima

$$Q_{V.S.max} := f_{R,k} \cdot 2 \cdot A_{S.net} \square 4.9 \text{ kN}$$

Murtomekanismi 1: Lamellikerrosten lautojen syiden suuntainen leikkausvoima leikkauslujuudella

Poikittaisen kerroksen leikkauslujuuden ominaisarvo C24 sahatavaralla

$$f_{V,k} := 4.0 \frac{N}{mm^2}$$

Yhden lamellikerroksen lautojen poikkipinta-ala

$$A_{S.net} := b_{CLT} \cdot h_{CLT} \square 1950 \text{ mm}^2$$

Suurin mahdollinen leikkausvoima

$$Q_{V.S.max} := 2 \cdot f_{V,k} \cdot A_{S.net} \square 15.6 \text{ kN}$$

Murtomekanismi 2: Lamellikerrosten välisen liimauksen vääntöleikkausvoima

Polaarinen jäyhyysmomentti

$$I_p := \frac{b_{CLT} \cdot h_{CLT}}{12} \cdot (b_{CLT}^2 + h_{CLT}^2) \approx (8.33 \cdot 10^5) \text{ mm}^4$$

Risteävien lautojen välisen liimasauman vääntöleikkauslujuuden ominaisarvo CLT:lle

$$f_{vTk} := 2.5 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Liimattujen pintojen määrä

$$n_k := 2$$

Suurin mahdollinen leikkausvoiman aiheuttama vääntömomentti

$$M_{T,max} := \frac{n_k \cdot f_{vTk} \cdot I_p}{\frac{h_{CLT}}{2}} \approx 0.28 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Suurin mahdollinen leikkausvoima

$$Q_{T,max} := \frac{M_{T,max}}{\frac{h_{CLT}}{2}} \approx 18.5 \text{ kN}$$